

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a realizace inverzní planární F-antény pro kmitočtové
pásmo 868 MHz
Design and realisation of the planar inverted-F antenna
working at frequency band 868 MHz**

2020

DOMINIK HOLANĚ

Zadání bakalářské práce

Student:

Dominik Holan

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Návrh a realizace inverzní planární F-antény pro kmitočtové pásmo 868 MHz

Design and Realisation of the Planar Inverted-F Antenna Working at Frequency Band 868 MHz

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Inverzní planární F-anténa (PIFA) je specifický typ zářiče. Práce si klade za cíl popis, návrh a výrobu modelu antény na zadaném kmitočtu.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Nastudujte a popište základní typy planárních antén a jejich specifika.
2. Stručně popište pásmo 868 MHz a technologii LoraWAN.
3. Navrhněte PIFA anténu pracující v kmitočtovém pásmu 868 MHz, navržený model optimalizujte.
4. Realizujte praktický model antény dle návrhu.
5. Prověřte správnost návrhu a konstrukce měření.
6. Vyhodnoťte závěry provedených měření.

Seznam doporučené odborné literatury:


[1] BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2020


.....
podpis studenta

Poděkování

Velice rád bych poděkoval Ing. Markovi Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc, rady a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat planární inverzní F-anténu, zkráceně PIFA, pracující v ISM pásmu 868 MHz. V první části této práce je krátký úvod do problematiky antén, jejich základních parametrů a rozdělení. Dále tato práce pojednává o planárních anténách, jejich vlastnostech a rozdělení. V praktické části následuje návrh dané antény na zadaném kmitočtu a realizace praktického modelu antény dle návrhu. Následně je provedena správnost návrhu a konstrukce měřením.

Klíčová slova

anténa, inverzní planární F-anténa, ISM, kmitočet

Abstract

The goal of this thesis is design and realization of planar inverted F-antenna, shortly PIFA, working in ISM band 868 MHz. First part of this thesis is about short introduction to problematics of antennas, their basic parameters and distribution. Furthermore this thesis is about planar antennas and also their properties and distribution. In practical part follows design of PIFA antenna at the specified frequency and realization of practical model of this antenna. Moreover correctness of the design and construction is performed by measuring.

Key words

antenna, frequency, ISM, planar inverted F-antenna

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
Seznam použitých zkratk.....	- 11 -
Seznam ilustrací a tabulek.....	- 12 -
Úvod.....	- 15 -
1 Anténa a její základní vlastnosti.....	- 16 -
1.1 Vstupní impedance	- 17 -
1.2 Vstupní činitel odrazu S_{11} a PSV	- 17 -
1.3 Vyzařovací a směrová charakteristika.....	- 18 -
1.4 Šířka pásma	- 19 -
1.5 Zisk antény	- 19 -
2 Planární antény.....	- 20 -
2.1 Základní popis	- 20 -
2.1.1 Antény se zavěšeným flíčkem.....	- 20 -
2.1.2 Antény s ohnutým flíčkem	- 21 -
2.2 Dělení planárních antén.....	- 21 -
2.2.1 Mikropásková flíčková anténa	- 21 -
2.2.2 Antény se zavěšeným flíčkem.....	- 23 -
2.2.3 Inverzní planární F-anténa a inverzní planární L-anténa	- 24 -
2.2.4 Planární monopolní anténa.....	- 26 -
3 LoRaWAN a pásmo 868 MHz	- 27 -
4 Návrh, simulace a optimalizace inverzní planární F-antény	- 28 -
4.1 Výpočet rozměrů a výběr typu PIFA	- 28 -
4.2 Simulace antény v softwaru CST studio	- 30 -
4.2.1 První typ antény	- 30 -
4.2.2 Druhý typ antény.....	- 34 -
4.2.3 Třetí typ antény	- 36 -
4.3 Optimalizace antény.....	- 39 -
4.3.1 Optimalizace rozměrů antény uvnitř ABS krabice	- 42 -
5 Výroba antény	- 46 -
6 Měření antény.....	- 49 -
6.1 Vyhodnocení naměřených hodnot.....	- 50 -
6.2 Porovnání naměřených hodnot se simulovanými.....	- 51 -

Závěr	- 53 -
Použitá literatura	- 54 -
Seznam příloh.....	I
A. Okótovaný model antény a krabíčky.....	III
B. Měření antény.....	VII
C. CST	XI

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
B	Hz	Šířka pásma
c	m/s	Rychlost světla
d	m	Délka antény
ϵ_r	-	Relativní permitivita
f	Hz	Frekvence/kmitočet
G	dBi	Zisk antény
h	m	Výška antény
I	A	Proud
I_{in}	A	Vstupní proud
L	m	Délka substrátu
L_z	m	Délka zářiče
λ	m	Vlnová délka
λ_0	m	Délka vlny ve volném prostoru
λ_1	m	Vlnová délka odpovídající spodnímu okraji přizpůsobené impedanční šířky
P_{in}	W	Vstupní výkon
R_{in}	Ω	Vstupní činný odpor
R_l	Ω	Ztrátový odpor
R_r	Ω	Vyzařovací odpor
ρ	-	Bezrozměrný činitel odrazu
S₁₁	dB	Vstupní činitel odrazu
š	m	Šířka antény
U_{in}	V	Vstupní napětí

seznam použitých symbolů

$U(\theta, \Phi)$	W/m^2	Intenzita záření
W	m	Šířka substrátu
W_m	m	Šířka mezery
w_s	m	Šířka zkratovacího pinu
W_z	m	Šířka zářiče
W_{zk}	m	Šířka zkrat. Pinu
X_{in}	Ω	Vstupní reaktance
Z_{in}	Ω	Vstupní impedance

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CSS	Chirp spread spectrum
CST	Computer Simulation Technology
FHSS	Frequency hopping spread spectrum
FR4	Flame retardant 4
FSK	Frequency shift keying
GSM	Global System for Mobile Communications
ISM	Industrial, scientific and medical
LoRa	Long Range (protokol)
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
PIFA	planární inverzní F-anténa
PILA	planární inverzní L-anténa
PSV	Poměr stojatých vln
SMA	SubMiniature version A
VSWR	Voltage standing wave ratio
Wi-fi	Wireless fidelity

Seznam ilustrací a tabulek

Číslo ilustrace, tabulky	Název ilustrace, tabulky	Číslo stránky
1.1	Anténa jako přenosové médium	- 16 -
1.2	Vyzařovací vzory (charakteristiky)	- 18 -
1.3	Graf šířky pásma	- 19 -
2.1	Anténa se zavěšeným flíčkem	- 20 -
2.2	Anténa s ohnutým flíčkem	- 21 -
2.3	Mikropásková flíčková anténa s atypickým tvarem zářiče	- 22 -
2.4	Nejčastější tvary zářičů používané u mikropáskových flíčkových antén	- 22 -
2.5	(a) Anténa s vyříznutým otvorem ve tvaru U (b) anténa s vyříznutými otvory ve tvaru L	- 23 -
2.6	Geometrie antény se zavěšeným flíčkem	- 24 -
2.7	Různé druhy PIFA	- 24 -
2.8	PILA	- 25 -
2.9	(a) vznik PIFA z monopolu (b) vznik PIFA z planárního monopolu (c) vznik PIFA z mikropáskové flíčkové antény	- 25 -
2.10	Nejpoužívanější tvary planárních monopolů	- 26 -
3.1	Pásmo 868 MHz	- 27 -
4.1	Rozměry plastové krabičky	- 28 -
4.2	Rozměry prvního a druhého typu vybraných planárních antén	- 29 -
4.3	První typ PIFA – pohled zepředu (CST)	- 30 -
4.4	První typ PIFA - pohled zezadu (CST)	- 31 -
4.5	První typ PIFA - pohled zboku (CST)	- 31 -
4.6	Graf frekvenční závislosti zisku prvního typu antény	- 32 -

4.7	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} prvního typu antény	- 32 -
4.8	Směrová charakteristika prvního typu PIFA	- 33 -
4.9	Druhý typ PIFA pohled zezadu (CST)	- 34 -
4.10	Druhý typ PIFA pohled zepředu (CST)	- 34 -
4.11	Graf frekvenční závislosti zisku druhého typu antény	- 34 -
4.12	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} druhého typu PIFA	- 35 -
4.13	Směrová charakteristika druhého typu PIFA	- 35 -
4.14	Konečný tvar PIFA ve víku – pohled shora	- 36 -
4.1	Rozměry konečného typu PIFA	- 36 -
4.15	Konečný tvar PIFA ve víku - pohled zdola	- 37 -
4.16	Frekvenční závislost parametru S_{11} třetího typu PIFA	- 37 -
4.17	Směrová charakteristika třetího typu PIFA	- 38 -
4.18	3D vyzařovací charakteristika zisku třetího typu PIFA	- 38 -
4.19	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na délce zkratovacího pinu	- 39 -
4.20	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na pozici X konektoru	- 40 -
4.21	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na Y pozici konektoru	- 41 -
4.22	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na délce meandru L_z	- 41 -
4.23	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} optimalizované PIFA	- 42 -
4.24	Model krabičky v CST studiu	- 43 -
4.25	Pozice antény v ABS krabičce	- 43 -
4.26	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} antény v krabičce	- 44 -
4.27	Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} optimalizované PIFA v krabičce	- 45 -

5.1	Ukázka výroby antény na frézce	- 46 -
5.2	Tři vyfrézované vzorky antény	- 47 -
5.3	SMA konektor pro montáž na PCB	- 47 -
5.4	Vyrobená anténa - horní strana (flíček)	- 48 -
5.5	Vyrobená anténa - spodní strana (zemní rovina)	- 48 -
6.1	Ukázka pracoviště	- 49 -
6.2	Naměřený parametr S_{11} bez krabičky a v krabičce	- 50 -
6.3	Porovnání naměřených a simulovaných parametrů S_{11}	- 51 -
6.4	Porovnání naměřených a simulovaných parametrů S_{11} v krabičce	- 52 -

Úvod

Antény se používají k přeměně elektrické energie na energii elektromagnetických vln (rádiových signálů). Slouží buď k příjmu, nebo vysílání rádiových signálů. Tyto signály se používají pro přenos informace. Bakalářská práce se zabývá jedním z typů těchto antén, konkrétně se jedná o planární inverzní F-anténu. Písmeno F je v názvu, protože anténa připomíná svým vzhledem toto písmeno. Tyto antény jsou známy především pro své dobré vlastnosti, ke kterým patří malá velikost, poměrná jednoduchost na výrobu a tenký profil. Nejčastěji jsou používány v mobilních zařízeních, také pro Global System for Mobile Communications (GSM), Bluetooth, Wireless fidelity (Wi-fi), ale i další odvětví nejen rádiové techniky.

První část této práce se zabývá základními informacemi o anténě a jejími základními vlastnostmi, ke kterým například patří vstupní impedance, šířka pásma, zisk, polarizace apod.

Druhá část pojednává o planárních anténách. Základní popis těchto antén, tzn. jejich základní tvar, jak je rozlišíme od ostatních, jejich výhody nebo nevýhody, a v neposlední řadě také dělení těchto planárních antén. Planární antény se dělí na čtyři základní typy: mikropáskové flíčkové antény, antény se zavěšeným flíčkem, planární monopolní antény a planární inverzní F-antény, o kterých se tato práce zabývá.

Třetí částí je krátký popis o frekvenčním pásmu, ve kterém bude anténa pracovat, a také jaká technologie toto frekvenční pásmo používá.

Ve čtvrté části je popsáno několik návrhů a simulací planárních antén, kdy z těchto návrhů resp. simulací byl vybrán jeden, který vykazoval nejlepší vlastnosti pro dané pásmo. Tato část dále obsahuje optimalizaci vybraného typu. Jelikož anténa bude umístěna do ABS krabičky, tak následuje i optimalizace této anténní struktury za účelem dosažení co nejlepších parametrů v krabičce.

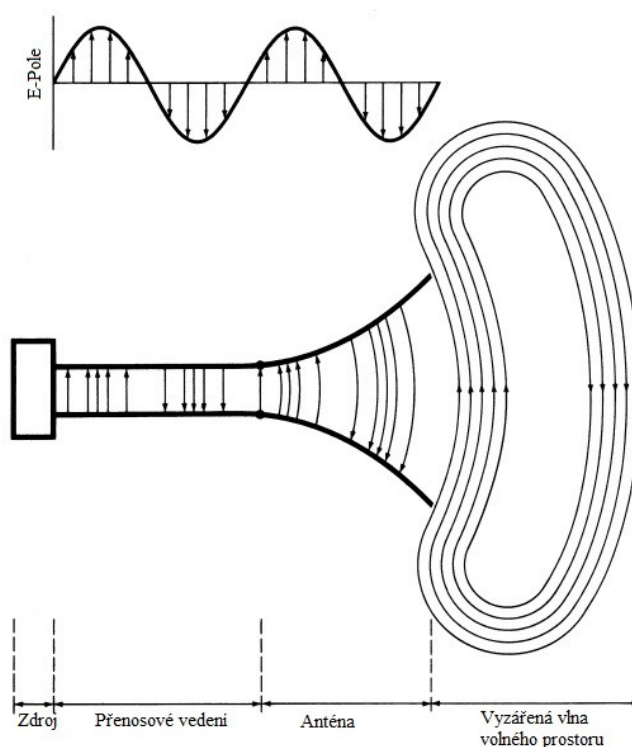
Pátá část se zabývá realizací, resp. výrobou antény, osazením konektoru a upravením anténních rozměrů.

Poslední část pojednává o ověření vlastností, které byly zjištěny pomocí počítačových simulací v softwaru Computer Simulation Technology. Ověření spočívá ve změření parametrů antény pro dané ISM pásmo, jejich vyhodnocení a porovnání se simulovanými parametry.

1 Anténa a její základní vlastnosti

V této kapitole je stručně popsáno, co to je anténa a základní parametry antén jako takových, s tím že důraz je zde kladen na parametry, které jsou pro nás klíčové v návrhu a implementaci inverzní planární F-antény.

Pojem anténa je podle Websterova slovníku definován jako typické kovové zařízení (například drát nebo tyč), které slouží pro vyzařování nebo přijímání rádiových vln. Jiná definice antény zní následovně: je to prostředek pro vyzařování nebo přijímání rádiových vln. Jinými slovy, anténa je přechodné zařízení mezi volným prostorem a přenosovým zařízením (znázorněno na obrázku 1.1). Přenosové zařízení nebo přenosové vedení může mít podobu koaxiální linky nebo duté trubky (vlnovod) a používá se k přenosu elektromagnetické energie ze zdroje vysílání do antény nebo z antény do přijímače. V prvním případě hovoříme o vysílací anténě a v druhém případě hovoříme o přijímací anténě.[1]



Obrázek 1.1: Anténa jako přenosové médium[1]

Pokud budeme mluvit o mechanismu vyzařování elektromagnetické vlny, tak pakliže zdroj bude vytvářet mezi dvěma vodiči elektrické i magnetické pole, poté pohyb elektronů ve vodičích vyvolá tekoucí proudy a následně se v prostoru vytváří magnetické pole. Vznik vyzářené vlny volného prostoru je pak dán postupem tohoto pole dále v čase od zdroje.[2]

Antény se dají dělit podle různých vlastností a parametrů na mnoho druhů, s tím že nejhlavnější vlastnosti jsou vyzařovací diagram a jakým způsobem se anténa používá. Dají se

dělit například do šesti kategorií, a ty jsou následující: tvar zářiče, polarizace, šířka pracovního pásma, vzájemné uspořádání zářičů, rozložení vlny na anténě a tvar vyzařovací charakteristiky.[2]

1.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance je poměr napětí a proudu na vstupních svorkách antény. Tato impedance se skládá ze dvou složek, a to reálné a imaginární. Reálná část se skládá také ze dvou částí: vyzařovací odpor (odpor antény při vyzařování vlny) a ztrátový odpor (odpor v důsledku ztrát v anténních prvcích). Imaginární složka je reaktance antény na těchto svorkách. Tato reaktance může mít jak induktivní tak kapacitní charakter. Vstupní impedanci je potřeba přizpůsobit (pro správné fungování antény) a k tomuto účelu se používají přizpůsobovací články. Závisí na několika faktorech, například na vzdálenosti ostatních objektů od antény, proto se v praxi u většiny antén vstupní impedance určuje experimentálně. Tuto veličinu vyjadřují následující vztahy:[1][2]

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} [\Omega] \quad (1.1)$$

$$R_{in} = R_r + R_l [\Omega] \quad (1.2)$$

Z_{in} – vstupní impedance $[\Omega]$

U_{in} - napětí na vstupních svorkách antény $[V]$

I_{in} - proud na vstupních svorkách antény $[A]$

R_{in} – vstupní činný odpor $[\Omega]$

X_{in} - vstupní reaktance $[\Omega]$

R_r – vyzařovací odpor $[\Omega]$

R_l – ztrátový odpor $[\Omega]$

[1][2]

1.2 Vstupní činitel odrazu S_{11} a PSV

S_{11} - tento parametr je znám jako koeficient odrazu (nebo také vstupní činitel odrazu), který popisuje, kolik energie se odráží od antény. Pokud je S_{11} rovno 0 dB, pak veškerá energie, která je dodána do antény, je odražena a nic není vyzařováno. Pokud S_{11} je roven například -12 dB a energie dodávána do antény je 4 dB, pak odražená energie antény bude rovna -8 dB. Zbytek energie je doručen do antény. Tato doručená energie je buď vyzařena, nebo pohlcena jako ztráty v anténě. V ideálním případě je skoro všechna energie dodávaná do antény vyzařována.[11]

Vztah mezi S_{11} a bezrozměrným činitelem odrazu je dán následovně:

$$\rho = 10^{\frac{S_{11}}{20}} \quad (1.3)$$

[5][6][11]

PSV – poměr stojatých vln (anglicky voltage standing wave ratio - VSWR), je poměr mezi maximální a minimální amplitudou při stojatém vlnění, ale dá se vypočítat i pomocí vstupního činitele odrazu. Tento poměr může nabývat hodnot od 1 do nekonečna a také vyjadřuje přizpůsobení antény. Ideální hodnota PSV je 1:1, při návrhu antény se snažíme co nejlépe přiblížit této hodnotě. Nejčastěji se vypočítává ze vztahu se vstupním činitelem odrazu:[5][6][11]

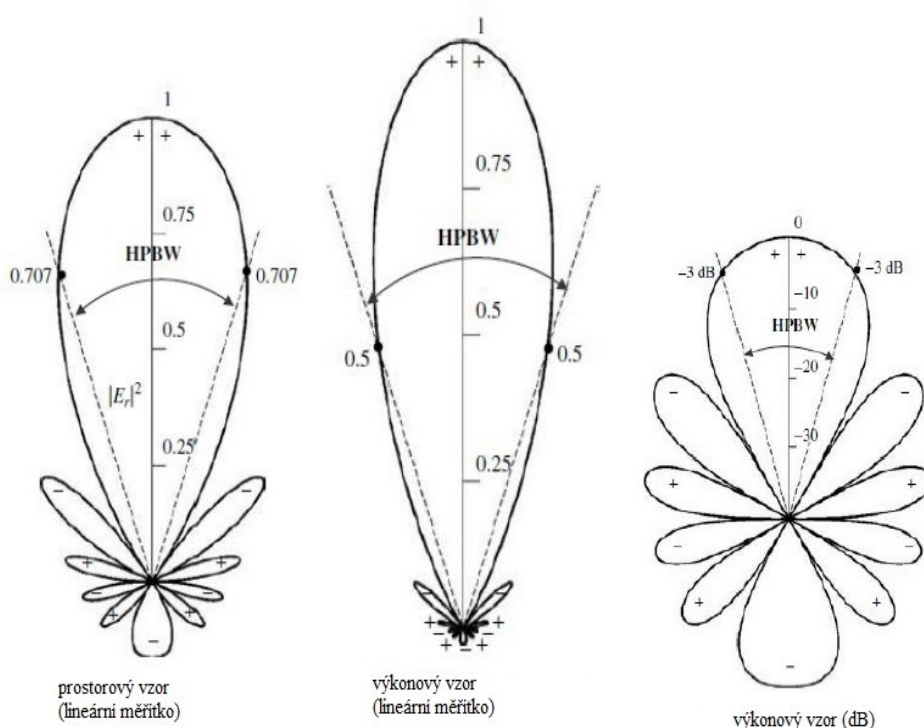
$$PSV = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad [-] \quad (1.4)$$

[5][6][11]

1.3 Vyzařovací a směrová charakteristika

Anténní vyzařovací charakteristika je reprezentována jako matematická funkce nebo grafické zobrazení vyzařovacích vlastností antény v prostoru. Může být reprezentována až třemi vzory, a to prostorovým vzorem, výkonovým vzorem v lineárním měřítku a výkonovým vzorem v dB.[3]

Vyzařovací charakteristika a směrová charakteristika jsou ty samé charakteristiky charakterizující vlastnosti antény, konkrétně směrové, ale v případě vyzařovací charakteristiky mluvíme o vysílací anténě a v případě směrové charakteristiky mluvíme o přijímací anténě.[2]

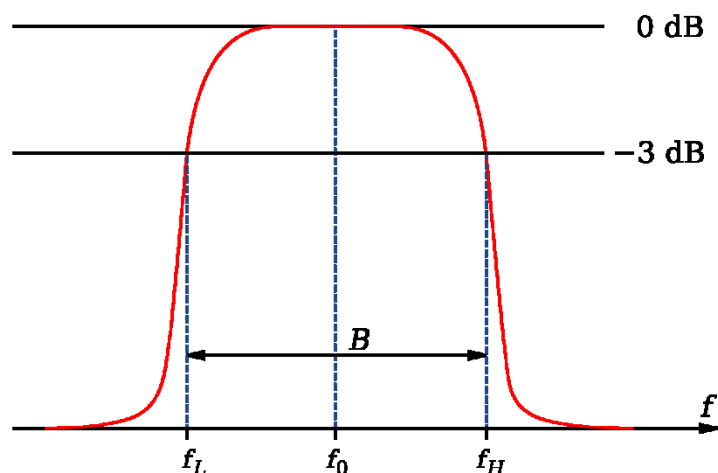


Obrázek 1.2: Vyzařovací vzory (charakteristiky)[3]

1.4 Šířka pásma

Značí se velkým písmenem B a udává nám rozsah frekvencí, na kterých má anténa požadované vlastnosti. Určíme ji poklesem o -3 dB oproti maximální hodnotě.

U širokopásmových antén může být šířka pásma definována jako poměr horních a dolních frekvencí povoleného rozsahu.[1]



Obrázek 1.3: Graf šířky pásma[4]

1.5 Zisk antény

Zisk antény v daném směru, je poměr intenzity v daném směru k intenzitě záření, která by byla získána, pokud by výkon přijatý anténou byl vyzařován izotropně. Intenzita záření odpovídající izotropně vyzářenému výkonu je rovna výkonu přijatému anténou poděleným 4π . [1]

$$G = 4\pi \frac{\text{intenzita záření}}{\text{přijatý výkon}} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{in}} [-] \quad (1.5)$$

[1]

Ve většině případů se setkáváme s relativním ziskem, kde je potřeba, aby vstupní výkon byl stejný pro obě antény. Využívá se zde i referenční antény, což je ve většině případů dipól nebo i jiná anténa, jejíž zisk je znám nebo se dá vypočítat. Relativní zisk je poměr výkonového zisku v daném směru k výkonovému zisku referenční antény a jejího referenčního směru. [1]

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \Phi)}{P_{in}(\text{bezeztrátový izotropický zdroj})} [-] \quad (1.6)$$

[1]

2 Planární antény

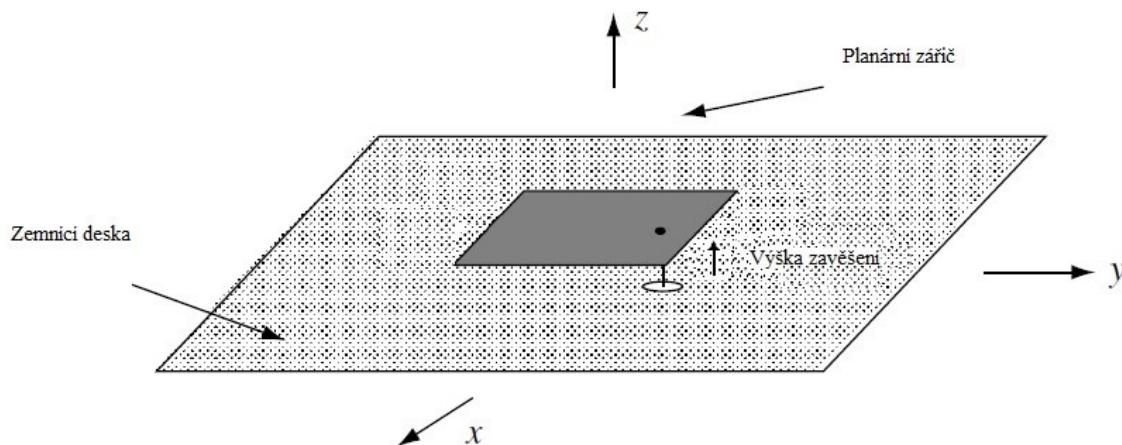
V této kapitole jsou shrnuty základní informace o planárních anténách, jejich dělení s větším zaměřením na popis jednotlivých typů těchto antén.

2.1 Základní popis

Tištěné mikropáskové antény, šterbinové antény, antény se zavěšeným flíčkem, planární inverzní L-antény a planární inverzní F-antény (PILA a PIFA), planární dipóly, planární monopoly atd. všechny tyto výše uvedené antény se dají zařadit jako planární antény, ale dá se říct, že i všechny antény s planárním nebo nějakým způsobem zakřiveným zářičem se dají označit jako planární. Jejich nejčastější výhody jsou jednoduchá struktura, nízká cena, malý profil, malá velikost, velká čistota polarizace nebo také velká šířka pásma. Nejčastěji se používají v bezdrátových komunikačních systémech. Tyto antény se dle tvaru zakřivení zářiče a polohy zářiče nejčastěji dělí na dva typy. Následuje rozdělení planárních antén do těchto dvou typů.[7]

2.1.1 Antény se zavěšeným flíčkem

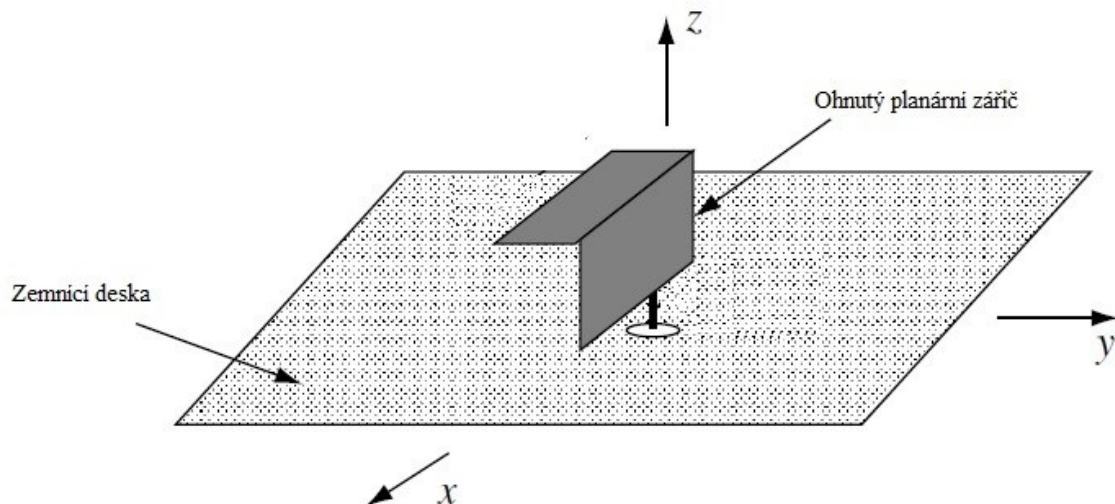
Jak už název napovídá, jedná se o antény, u kterých jejich hlavní vlastnost spočívá v tom, že je jejich zářič zavěšen (v určité výšce) paralelně vůči zemní desce. Pro lepší představu je tento typ antény zobrazen na obrázku 2.1.[7]



Obrázek 2.1: Anténa se zavěšeným flíčkem[7]

2.1.2 Antény s ohnutým flíčkem

Podobně jako u předchozího typu antény, tak i o vzhledu tohoto typu napovídá jeho název. Zde je planární zářič zakřiven pod určitým úhlem, nejčastěji se jedná o úhel 90 stupňů. Zahnutí má za následek změnu impedance a vyzařovací charakteristiky.[7]



Obrázek 2.2: Anténa s ohnutým flíčkem[7]

2.2 Dělení planárních antén

Na základě jejich vlastností a konstrukce se dělí do čtyř základních skupin, které se také nejčastěji vyrábějí. Jedná se o následující skupiny:

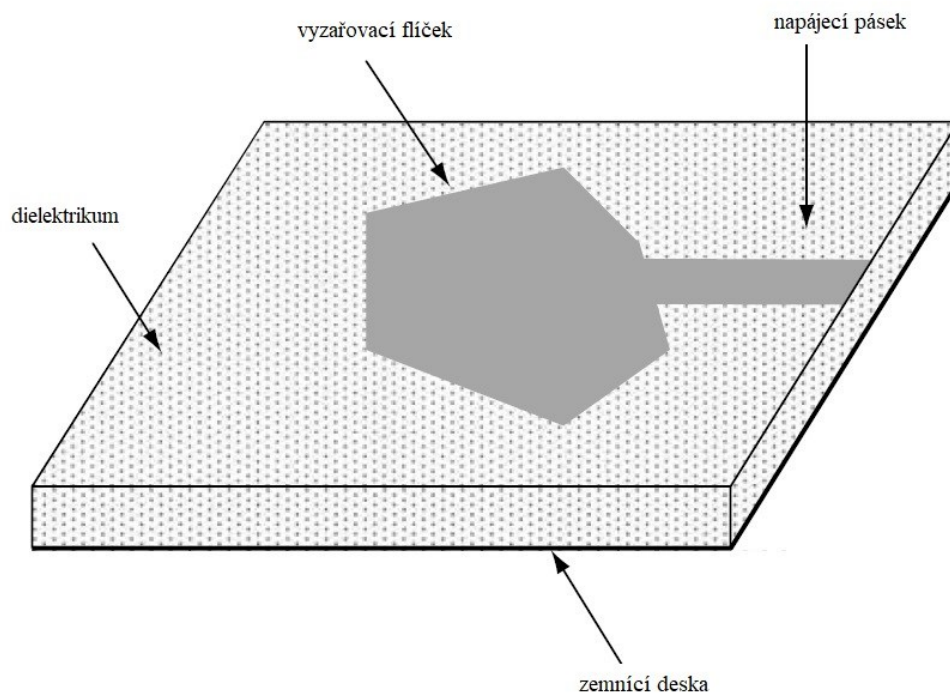
- Mikropáskové flíčkové antény
- Antény se zavěšeným flíčkem
- Planární inverzní F-antény a planární inverzní L-antény (PIFA a PILA)
- Planární monopolní antény

[7]

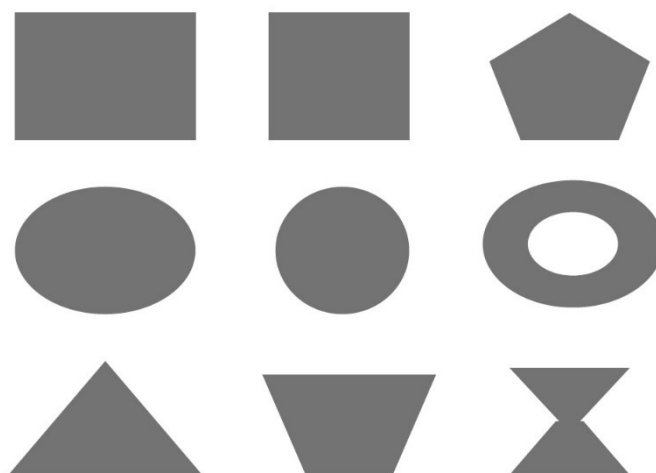
2.2.1 Mikropásková flíčková anténa

Mikropáskové flíčkové antény jsou jedním ze základních a důležitých typů planárních antén. Techniky a koncepty používané při výrobě a použití těchto antén se používají prakticky i v ostatních typech planárních antén. Jejich tloušťka je obvykle menší než $0,03 \lambda_0$. Tyto antény mají velmi malou hmotnost, a to jak v důsledku jejich velikosti, tak v důsledku toho, že jsou vyrobeny z perfektně vodivých fólií upevněných na dielektrickém substrátu. Mohou být i neplanární, což jim vnáší velikou výhodu v oblasti použití, a navíc jsou velmi univerzální, proto může být nejenom při výrobě, ale i při používání využito mnoho jiných technik a vlastností než je tomu u planárních antén. Mohou být implementovány na jiný obvod s dalšími planárními

obvody. Mezi nevýhody můžeme například zařadit malý rozsah impedance a slabou čistotu polarizace, což limituje oblast použití této antény. Materiál zářiče je nejčastěji měď. Jejich tvary mohou být od obdélníků, čtverců až po pětiúhelníky a kruhy. Tato anténa se nejčastěji používá v radiokomunikační technice pro radary, navigace, senzory a v neposlední řadě také v biomedicíně.[7]



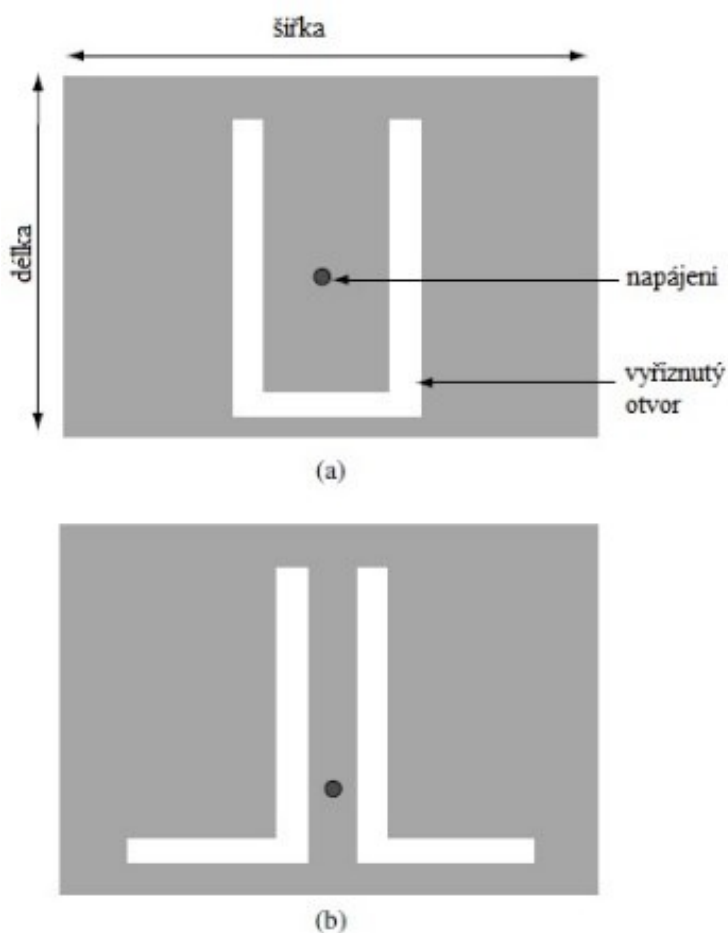
Obrázek 2.3: Mikropásková fličková anténa s atypickým tvarem zářiče[7]



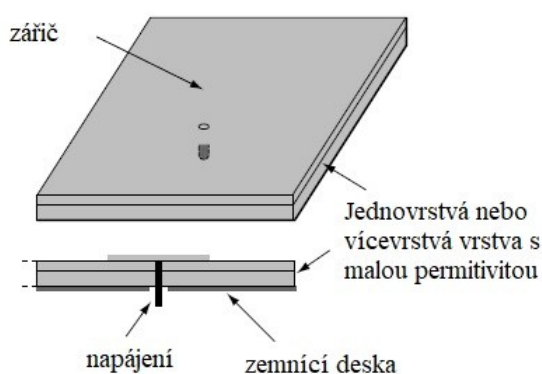
Obrázek 2.4: Nejčastější tvary zářičů používané u mikropáskových fličkových antén[7]

2.2.2 Antény se zavěšeným flíčkem

Tyto antény mohou mít unikátní design oproti ostatním planárním anténám, i přesto že jsou pouze variantou mikropáskových flíčkových antén. Tento typ antény je velice jednoduchý na výrobu. Mezi hlavní komponenty potřebné na jejich výrobu patří podpora zářiče s nízkou permitivitou (pokud je vůbec potřeba), napájecí součástka, zemnicí plát a zářič. V prostoru mezi zářičem a zemnicím plátem se obvykle používá levná pěnová vrstva nebo vzduch a velikost této mezery je většinou od $0.03 \lambda_1$ do $0.12 \lambda_1$. K napájení této antény se nejčastěji používá koaxiální kabel. Impedanční šířka pásma je při $PSV = 2$ limitována na zhruba 8 %. Tato hodnota bohužel není moc velká, a proto se zde používají metody pro rozšíření šířky pásma. Mezi nejznámější metody pro rozšíření impedanční šířky pásma se používá metoda, při které se přidávají rezonátory. Parazitické rezonátory (nejčastěji flíčky) mohou být přidány na tu samou vrstvu hlavního flíčku nebo mohou být naskládány nad hlavním flíčkem, což zvětšuje rozměry antény. Je zde možno použít i další metody, a to takové, kde se do hlavní vrstvy vyříznou otvory různých tvarů (obrázek 2.5). Tyto otvory pak nezmění celkovou velikost antény a jejich cílem je zavést další rezonance s následným zvětšením impedanční šířky pásma. Pro zvětšení šířky pásma se používá elektromagnetická spojka.[7]



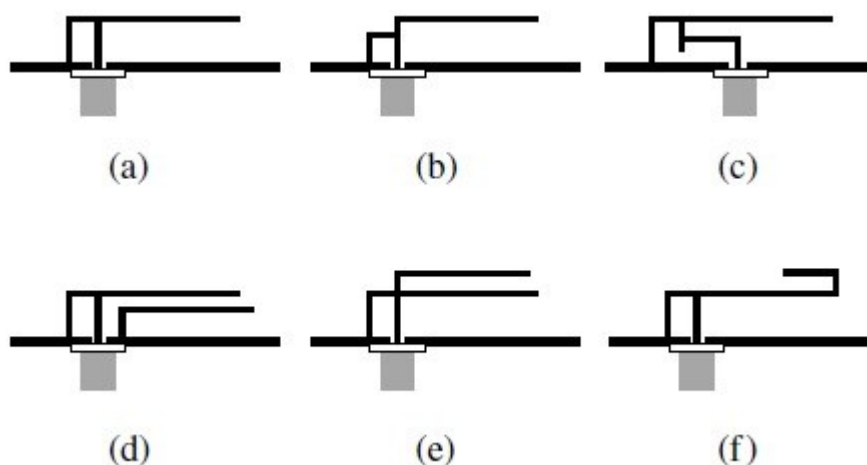
Obrázek 2.5: (a) Anténa s vyříznutým otvorem ve tvaru U (b) anténa s vyříznutými otvory ve tvaru L[7]



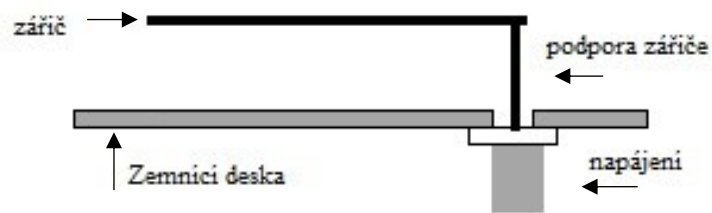
Obrázek 2.6: Geometrie antény se zavěšeným flíčkem[7]

2.2.3 Inverzní planární F-anténa a inverzní planární L-anténa

Se zařízeními jako jsou mobilní telefon, laptopy, přístupové body roste potřeba na co nejmenší rozměry antén. Tyto zařízení se neustále vyvíjejí, zmenšují a nabízejí čím dál tím více funkcí, větší baterii apod., to má za následek zmenšování rozměrů dalších komponentů v těchto zařízeních jako je tomu například u antén. Využívá se zde anténa s nízkým profilem. Tyto podmínky splňují například planární inverzní F a planární inverzní L-antény. Jedná se o monopolní antény a k dosažení menších rozměrů může být jejich monopol ohnutý. Odtud také pochází jejich název, u PIFA (obrázek 2.7) má monopol tvar písmene F a u PILA (obrázek 2.8) má monopol tvar písmene L. Typicky PIFA a PILA sestavené nad zemnicí deskou mají větší impedanční šířku pásma až do 3 %, v porovnání se základním typem těchto antén ve formě tenkého drátu s impedanční šířkou pásma asi 1 %. Vstupní impedance těchto antén je téměř reálná s odporem 37 Ω . [7]



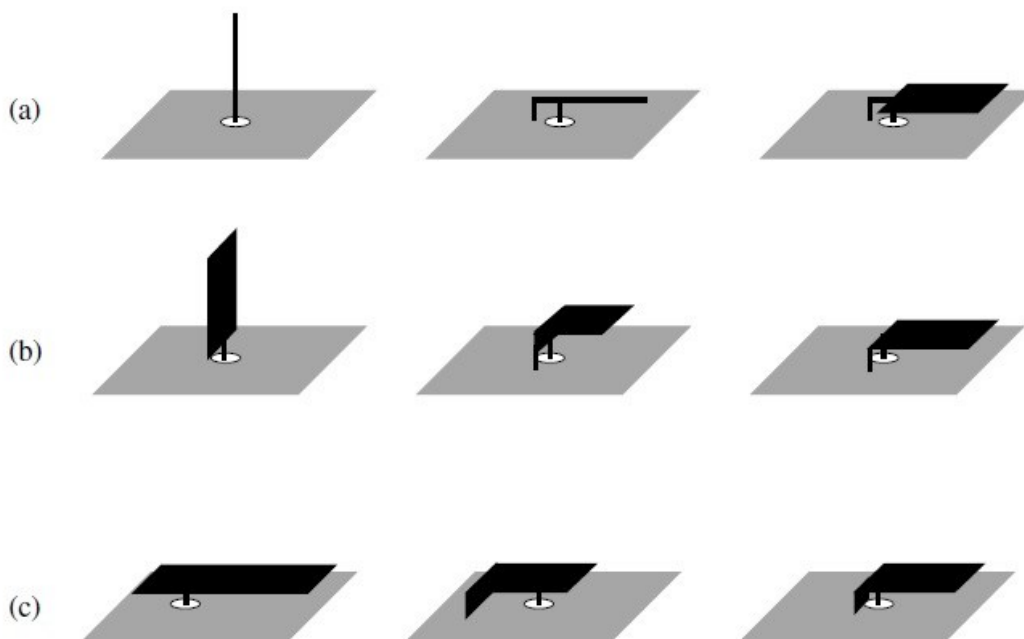
Obrázek 2.7: Různé druhy PIFA[7]



Obrázek 2.8: PIFA[7]

PIFA může vzniknout třemi způsoby:

- z drátového monopolu vzniká jeho zakřivením nízkoprofilová PIFA (obrázek 2.9 (a))
- z planárního monopolu pomocí ohnutí planárního zářiče a zavedení zkratovacího pinu pro dobré impedanční přizpůsobení (obrázek 2.9 (b))
- PIFA může být také variantou krátké flíčkové antény, kde flíček je ohnutý zhruba v polovině (obrázek 2.9 (c)).[7]



Obrázek 2.9: (a) vznik PIFA z monopolu (b) vznik PIFA z planárního monopolu (c) vznik PIFA z mikropáskové flíčkové antény[7]

Zemnicí deska má největší vliv na výkonnost této antény, ale je tomu tak i u ostatních antén, jako jsou monopóly, dipóly, mikropáskové antény. Vlastnosti zemnicí desky které nejvíce ovlivňují výkonnost PIFA antény jsou následující:

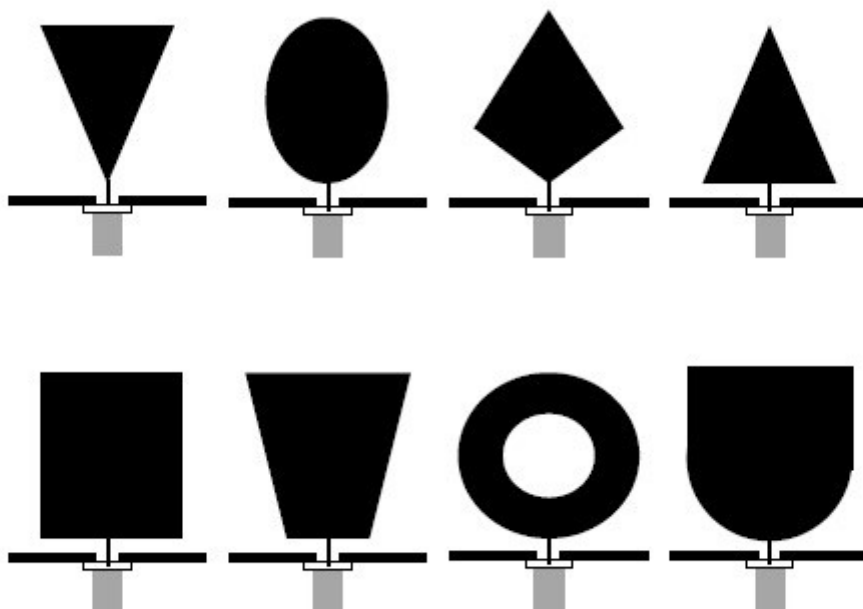
velikost – Příliš velká velikost ovlivňuje rezonanční frekvenci a vyzařovací charakteristiku. Naopak příliš malá velikost má za následek vyšší rezonanční frekvenci a menší směrovost. Výkonnost je silně závislá na orientaci a pozici PIFA na zemní desce.

tvár – různě zakřivený tvar desky může změnit impedanci a vyzařovací charakteristiku.

materiál – Deska nemusí být vyrobena z konvenčních materiálů (např. měď), ale může být vyrobena ze speciálních materiálů (např. povrchy s vysokou impedancí), což má za následek zlepšení výkonnosti nebo zmenšení rozměrů antény.[7]

2.2.4 Planární monopolní anténa

Planární monopolní antény jsou jednoduché, výkonné antény a řadí se mezi nejzákladnější typy antén. Drátové monopoly mohou disponovat například čistou vertikální polarizací a horizontálním všesměrovým zářením. Typické vzhledy těchto antén mohou být jednoduchý drát až jehlany, elipsy, sféry apod., ale tyto geometrické tvary mají oproti jednoduchému drátu velkou nevýhodu v celkovém objemu výsledné antény. Mohou být použity také planární vzhledy jako například trojúhelník, čtverec, obdélník apod. (obrázek 2.10), které zajistí rozšíření impedanční šířky pásma. Sférické a kónické tvary také dokáží rozšířit impedanční šířku pásma a to dokonce až do 70 %, ale tyto tvary antén se nepoužívají, jelikož velké a těžké antény jsou nepřijatelné. Proto se v převážné většině aplikací těchto antén používají tvary planární. Tyto antény se používají pro softwarově definované rádiové systémy, konfigurovatelné bezdrátové komunikační systémy a ultraširokopásmové systémy.[7]



Obrázek 2.10: *Nejpoužívanější tvary planárních monopolů*[7]

3 LoRaWAN a pásmo 868 MHz

Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) je komunikační protokol a systémová síťová architektura používající na své fyzické vrstvě protokol LoRa (Long Range protokol), který je schopen přenášet informace na velké vzdálenosti. Tento protokol spolu s LoRaWAN síťovou architekturou jsou nejdůležitějšími faktory určující například životnost baterie koncového bodu, kvalitu služeb, zabezpečení a aplikace poskytované touto sítí. Jako jedna z nejlepších modulací na fyzické vrstvě pro přenos dat pomocí nízkého výkonu se jeví FSK (Frequency shift keying – klíčování frekvenčním posunem). Toto klíčování by se mohlo zdát jako ideální pro použití při LoRaWAN, přesto se toto klíčování v LoRa nepoužívá. LoRa používá klíčování se zkratkou CSS (Chirp spread spectrum – tedy variantu rozprostřeného spektra s vysíláním krátkých kmitočtově rozmlítaných uzlů), toto klíčování se používá i v armádní oblasti po desetiletí díky tomu, že zachovává přenos pomocí nízkého výkonu jako je tomu u FSK, ale dokáže násobně navýšit vzdálenost přenosu informací. Jedna přístupová brána nebo stanice může pokrýt několik měst nebo stovky čtverečních kilometrů. Dosah značně závisí na hustotě zalidnění oblasti (počet budov a zástavby) a na prostředí. S minimální námahou na vybudování infrastruktury mohou být pokryta celá města. Tato technologie díky jiným regionální specifikacím v Americe a Evropě pracuje na odlišných frekvenčních pásmech.[8]

Kmitočtové pásmo 868 MHz s označením „g“[9], je možno používat podle všeobecného oprávnění.[9] V dokumentu jsou uvedeny základní podmínky pro používání pásma, jako například to, že zařízení nesmí působit škodlivé rušení stanicím radiokomunikačních služeb, které využívají rádiové kmitočty, že zařízení lze používat pouze s vestavěnou anténou, nebo s anténou kterou stanoví výrobce apod. Technické parametry zařízení pro určité typy zařízení (jako například naše anténa) pro jednotlivé pásma jsou zde také stanoveny. Pro pásmo 868 MHz a nespecifikovaná zařízení krátkého dosahu je stanoven vyzářený výkon na hodnotu 25 mW e.r.p.. Klíčovací poměr (duty cycle) je pro toto pásmo stanoven na méně nebo rovno jedné desetíně procenta. Klíčovací poměr je podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá v rámci jedné hodiny. Norma ČSN ETSI EN (300 220) se zaměřuje na rádiová zařízení pro použití v kmitočtovém rozsahu 25 MHz až 1 000 MHz s výkonem do 500 mW.[9]

Tabulka 3.1: *Pásmo 868 MHz*[9]

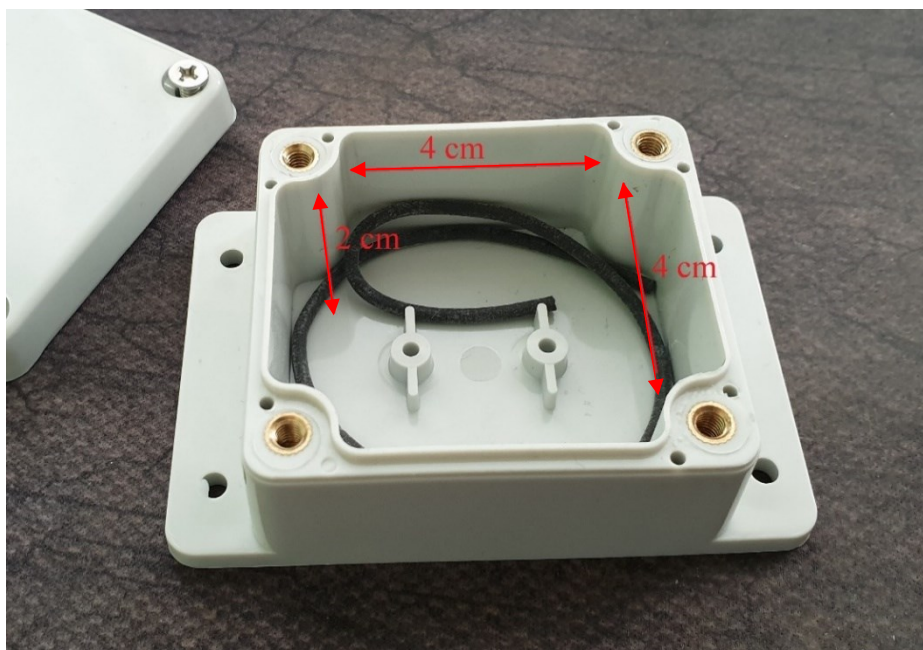
Kmitočtové pásmo - g 868 MHz	Vyzářený výkon	Šířka pásma	Klíčovací poměr	Další podmínky	Harmonizovaná norma (ČSN ETSI EN)
863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 100 kHz	≤ 0,1 %	FHSS	300 220

4 Návrh, simulace a optimalizace inverzní planární F-antény

Cílem této kapitoly je navrhnout a optimalizovat model PIFA antény, pracující na středním kmitočtu pásma 868 MHz označovaného jako g (ISM)[9], tzn. 866,5 MHz. Tato kapitola obsahuje výpočet rozměrů antény vycházejících z obecných vzorců. Rozměry antény jsou limitovány velikostí plastové krabičky, ve které bude anténa umístěna. Dalšími částmi kapitoly jsou popis tvorby modelu antény v programu CST studio, její simulace a optimalizace.

4.1 Výpočet rozměrů a výběr typu PIFA

Základním požadavkem bylo umístit anténu do ABS krabičky, o rozměrech viz obrázek 4.1. Dle rozměrů krabičky, ve které bude anténa umístěna, byl zvolen vhodný typ/varianta antény. Jako první byly vybrány dva typy planární antény, které jsou vidět na obrázku 2.9. První možný typ je znázorněn na tomto obrázku v řádku (c) na poslední pozici, další typ je v řádku (a) na druhé pozici. Následuje obrázek plastové krabičky a výpočet rozměrů antény. Víko má stejný tvar jako krabička.



Obrázek 4.1: Rozměry plastové krabičky

Z obrázku 4.1 je zřejmé, že anténa musí mít maximální rozměr 4 cm x 4 cm (šířka x délka). Co se týká dalších rozměrů, tak na výšku je zde místo cca 2 cm a výška PIFA je přibližně 1,5 mm, tento rozměr je tedy dostačující. Materiálem antény bude dostupný oboustranný cuprexit s tloušťkou mědi 35 μm . PIFA má čtvrtvlnnou pracovní frekvenci, proto se rozměry antény vypočítají ze vzorce:

$$h + d + \check{s} - w_s = \frac{\lambda}{4} \quad (4.1)$$

[10]

h – výška antény (velice malá a většinou se zanedbává, stejná velikost jako výška zkratovacího pinu) [m]

d – délka antény [m]

\check{s} – šířka antény [m]

w_s – šířka zkratovacího pinu [m]

λ – vlnová délka [m]

Po úpravě daného vzorce a zanedbání výšky antény, vzniká následující vzorec pro výpočet pracovní frekvence. Pro správný výpočet pracovní frekvence antény je potřeba znát ještě parametr ϵ_r (relativní permitivita). Tento parametr má pro materiál FR4 hodnotu 4,3.

$$f = \frac{c}{4 * \sqrt{\epsilon_r} * (d + \check{s} - w_s)} \text{ [Hz]} \quad (4.2)$$

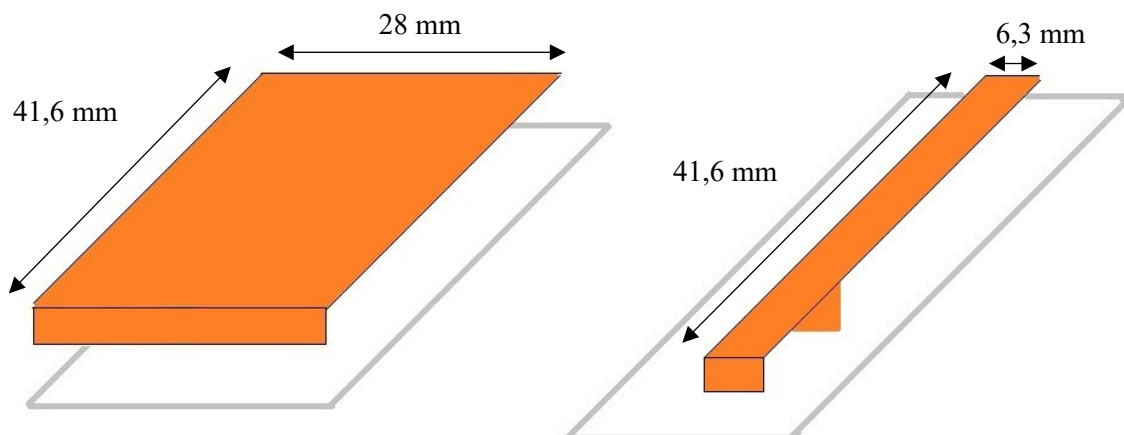
[10]

Po úpravě a dosazení do vzorce vznikne rovnost:

$$(d + \check{s} - w_s) = \frac{3 * 10^8}{4 * \sqrt{4,3} * 868 * 10^6} = 41,6684 \text{ mm} \quad (4.3)$$

[10]

Ze vztahu (4.3) lze počítat rozměry naší antény (jedná se o přibližné rozměry) s tím, že jsou v potaz brány rozměry krabičky a rozměry víka, do kterého lze anténu také umístit (rozměry antény mohou lehce přesahovat, tento problém se poté vyřeší v optimalizaci). Šířka zkratovacího pinu se zvolí na šířku zářiče. Po následném vypočítání rozměrů jsou hodnoty rovny: šířka – 28 mm, délka – 41,6 mm, šířka zkratovacího pinu – 28 mm. Tyto hodnoty platí pro první (širší) typ antény, který byl vybrán. Pro druhý (užší) typ jsou rozměry následující: (zde je šířka zkratovacího pinu také rovna šířce zářiče, proto se tyto velikosti vyruší a délka zářiče bude stejná jako výsledek rovnice 4.3) délka – 41,6 mm, šířka – 6,3 mm, šířka zkratovacího pinu – 6,3 mm. Tento druhý typ může být umístěn i kolmo v krabičce (v případě nedostatku místa).



Obrázek 4.2: Rozměry prvního a druhého typu vybraných planárních antén

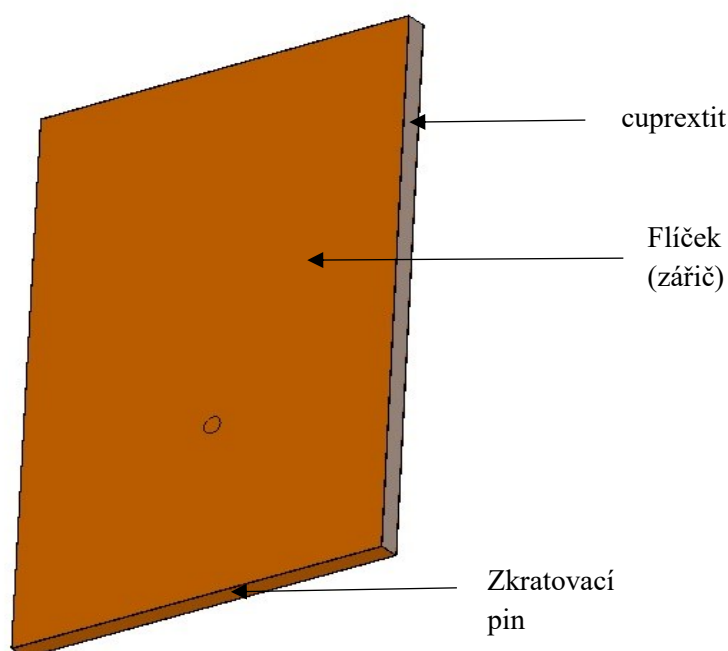
4.2 Simulace antény v softwaru CST studio

Tato kapitola obsahuje ukázky modelů vybraných typů antén a ukázky nasimulovaných parametrů v programu CST studio. Dále pak analýzu nasimulovaných parametrů, které vznikly pomocí vypočtených hodnot v předchozí kapitole. Poté model konečného typu antény, který bude optimalizován, vyroben a použit pro pásmo 868 MHz.

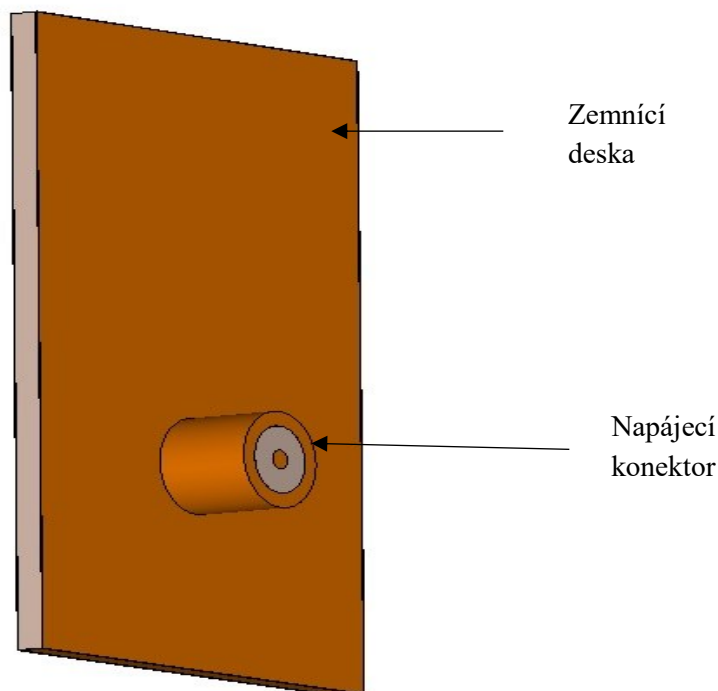
Program CST studio je profesionální program pro simulaci a optimalizaci antén. V tomto programu existuje několik „řešitelů“, a pomocí nich se vypočítávají parametry antén a anténních struktur. Mezi tyto řešitele patří například time domain solver, nebo frequency domain solver (slouží pro antény, které rezonují na celočíselném podílu vlnové délky, například čtvrtvlnné antény). Jelikož PIFA rezonuje na $\lambda/4$, tak je nutné použít tento frekvenční řešitel. Dále je zde i funkce optimizer, která slouží pro optimalizování antény a anténních struktur na daný kmitočet.

4.2.1 První typ antény

Podle teoretických výpočtů byl namodelován první typ PIFA. Jako materiál flíčku, zkratovacího pinu i zemnicí desky je použita měď, materiál substrátu mezi zemí a flíčkem je FR4, který je vysoký 1,5 mm. To znamená, že i výška zkratovacího pinu je 1,5 mm. Dále byl namodelován i standardní koaxiální napájecí konektor, který je umístěn přibližně doprostřed antény. Výsledný model je zobrazen na obrázcích 4.3 a 4.4.

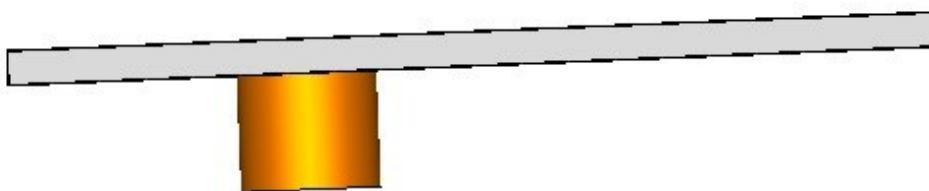


Obrázek 4.3: První typ PIFA – pohled zepředu (CST)



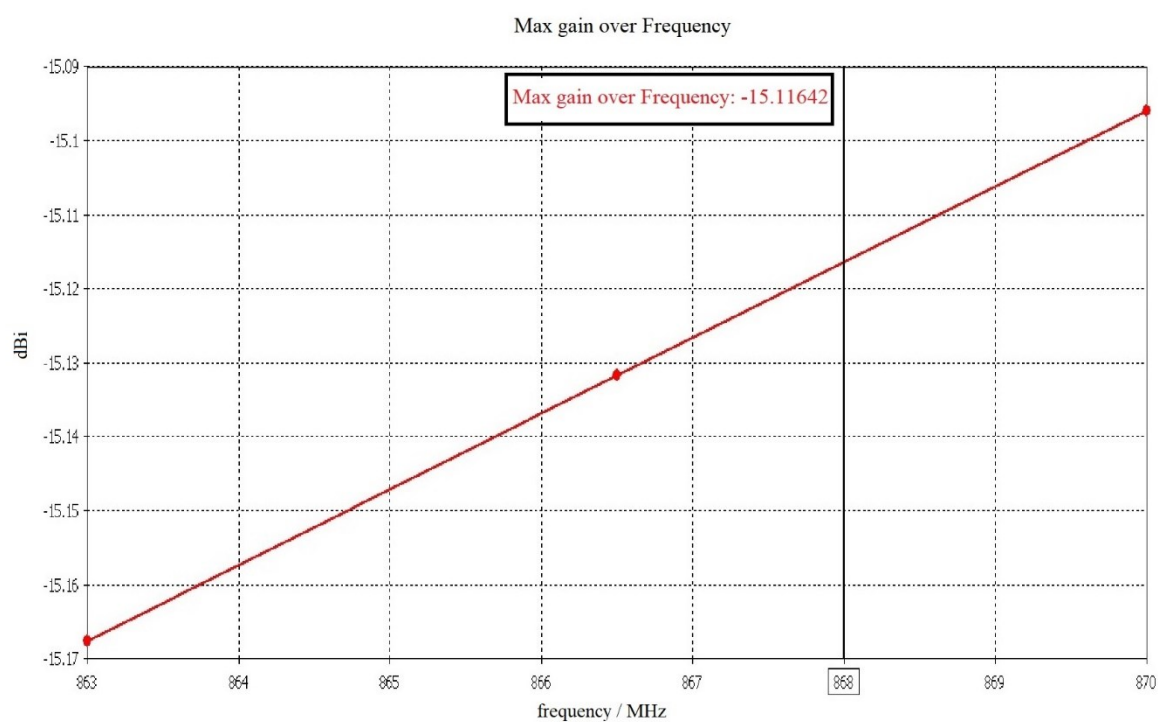
Obrázek 4.4: První typ PIFA - pohled zezadu (CST)

Velikost zemní desky (obrázek 4.4) bývá většinou několikrát větší než velikost flíčku, ale v důsledku velikosti plastové krabičky i víka, ve kterém může být také anténa umístěna, je tato možnost zapovězena. Je potřeba dosáhnout co největšího zisku, čehož lze dosáhnout při největší velikosti flíčku. Zároveň však nesmí být překročeny rozměry krabičky. Ve výsledku se proto budou rozměry zemní desky přibližovat rozměrům flíčku.

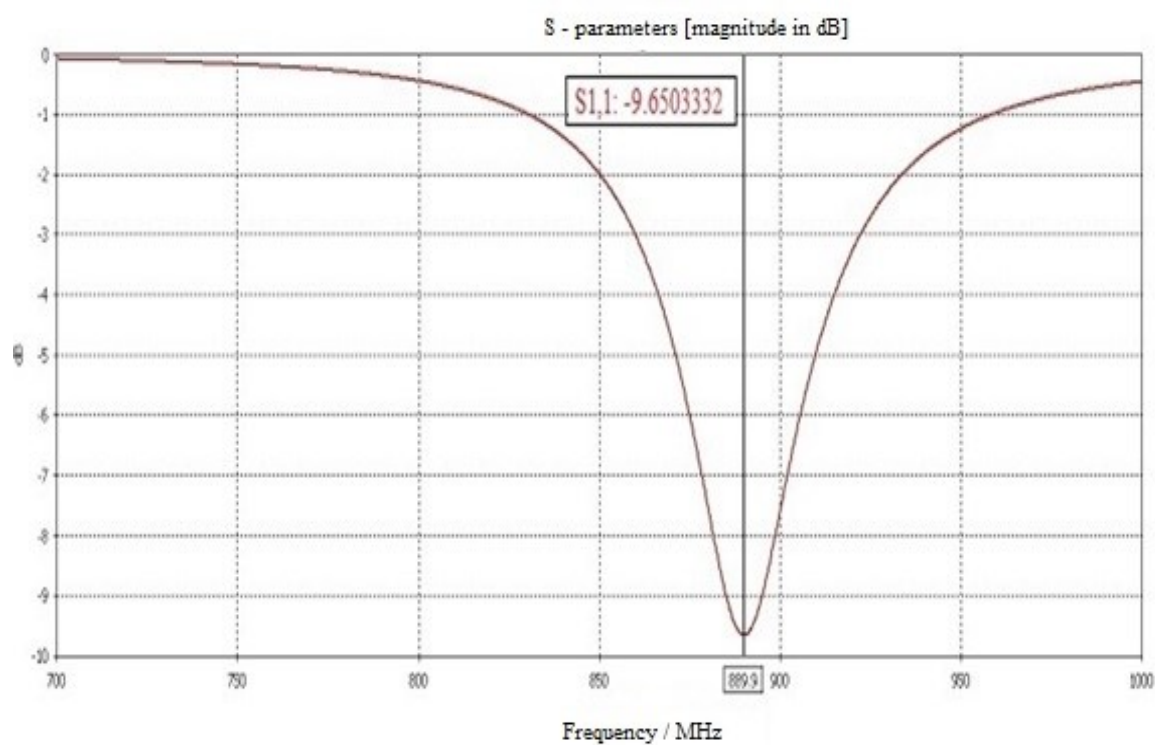


Obrázek 4.5: První typ PIFA - pohled zboku (CST)

Grafy 4.6 a 4.7 dvou nejvíce klíčových parametrů, které mají zásadní vliv na požadované vlastnosti antény, nám určí, jaká anténa bude nakonec vybrána pro použití. Jedná se o S-parametry a zisk.

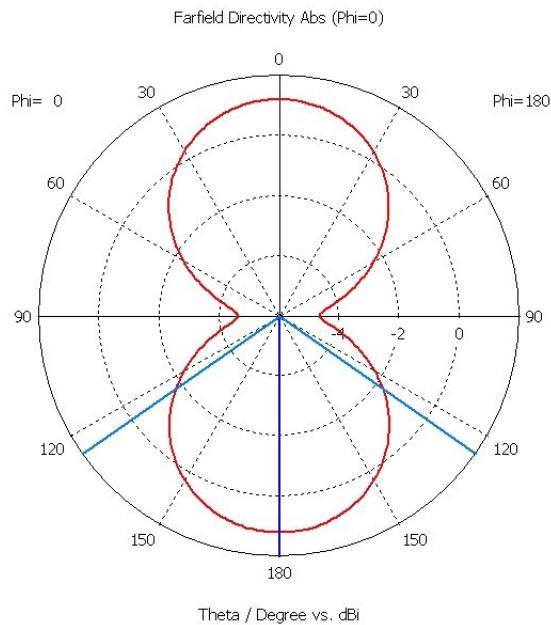


Obrázek 4.6: Graf frekvenční závislosti zisku prvního typu antény



Obrázek 4.7: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} prvního typu antény

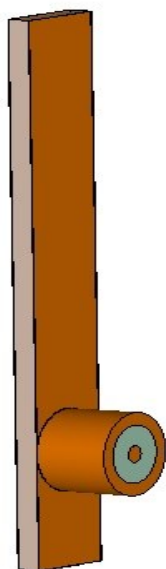
U grafu S-parametrů jde vidět, že tato anténa nedosahuje v minimu ani -10 dB, což je nutná podmínka pro fungování planární antény. Navíc anténa nepracuje na kmitočtu 866,5 MHz, anténu tedy bude nutné i v tomto směru optimalizovat. Následuje směrová charakteristika, která vykazuje maximum 1,2 dBi.



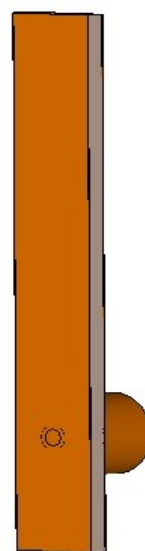
Obrázek 4.8: *Směrová charakteristika prvního typu PIFA*

4.2.2 Druhý typ antény

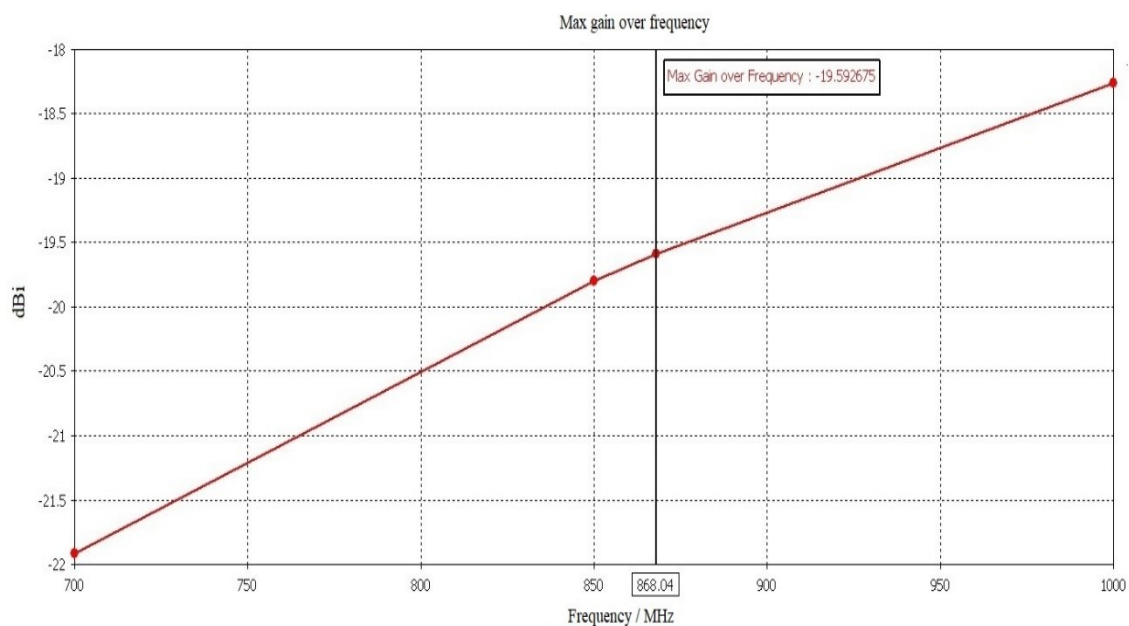
Druhý, užší typ byl znovu modelován podle teoretických vypočtených hodnot. Všechny materiály, i konektor byly voleny stejně jako u předchozího typu. Rozdíl je pouze v rozměrech. Důvodem tvorby tohoto druhého typu je jeho menší rozměr, a tedy možnost lepší manipulace uvnitř krabičky.



Obrázek 4.9: Druhý typ PIFA pohled zezadu (CST)

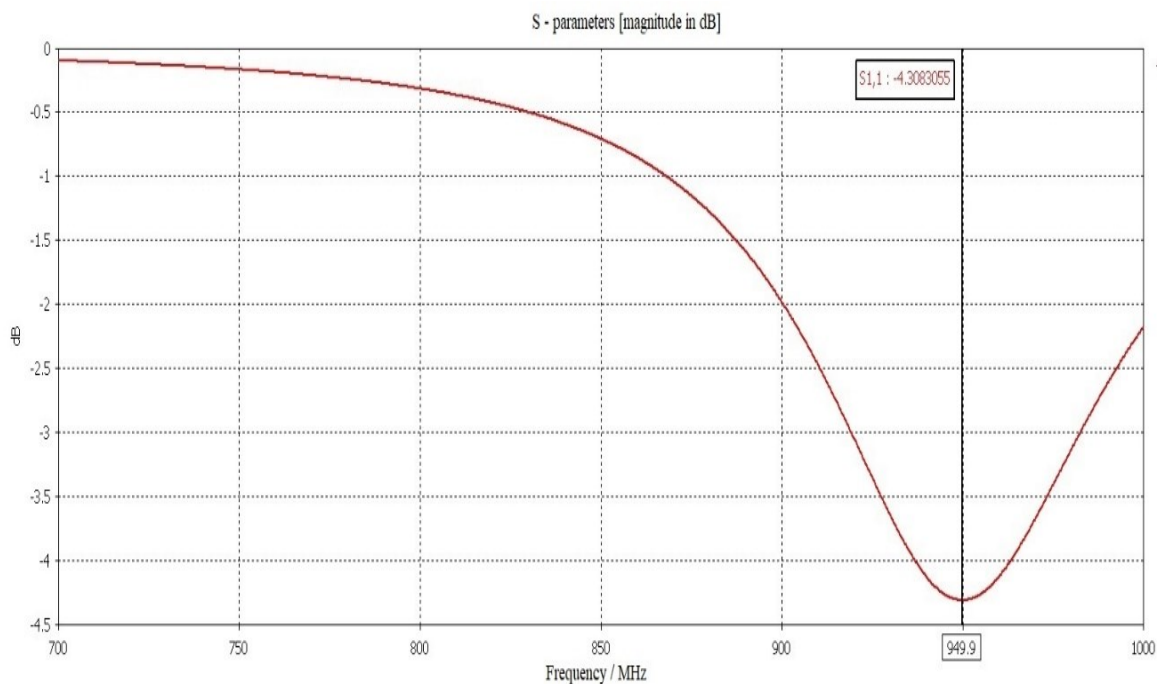


Obrázek 4.10: Druhý typ PIFA pohled zepředu (CST)



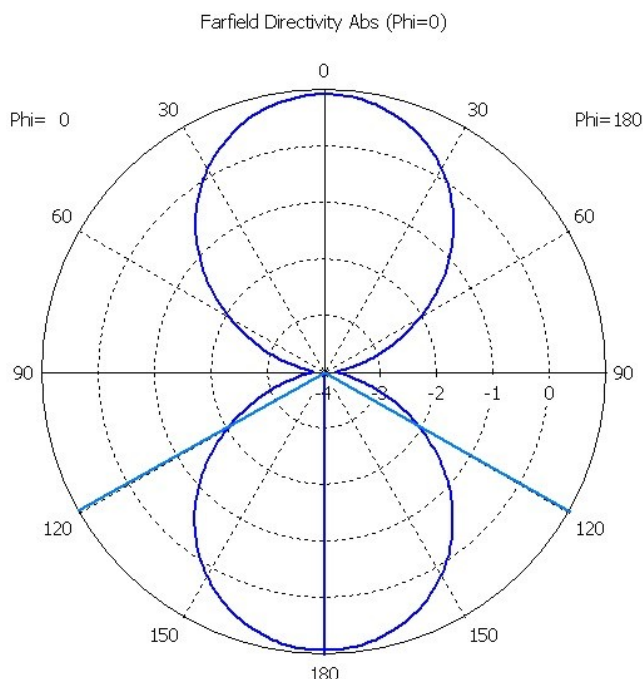
Obrázek 4.11: Graf frekvenční závislosti zisku druhého typu antény

Z obrázku 4.11 je patrné, že zisk druhého typu antény je o 4,5 dB nižší, což je způsobeno menší plochou zářiče. Jelikož je žádoucí maximální zisk, tak z tohoto hlediska nám více vyhovuje první typ antény.



Obrázek 4.12: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} druhého typu PIFA

Obrázek 4.12 ukazuje, že parametr S_{11} nedosahuje takových hodnot, jako u předchozího typu antény a navíc anténa rezonuje na frekvenci 949,9 MHz. Toto je důsledkem menších rozměrů antény, a také menší velikosti zemnicí desky, která nemůže být v tomto případě větší, jelikož by došlo ke ztrátě výhody tohoto typu, a to v jeho velikosti. Druhý typ je v porovnání s prvním typem horší.

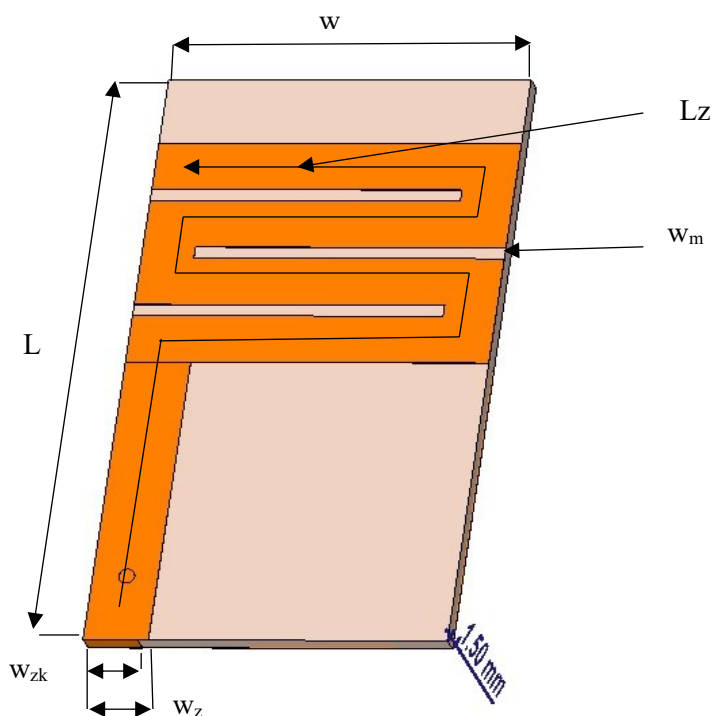


Obrázek 4.13: Směrová charakteristika druhého typu PIFA

Při srovnání obou typů antén je jasné, že pro použití do krabičky bude lepší zvolit první typ. První typ má v důsledku větší plochy lepší zisk, nižší hodnoty PSV i S_{11} -parametrů a jelikož má nejnižší hodnotu S_{11} -parametrů posunutou jenom o 23 MHz nad 866,5 MHz bude i snadnější jeho optimalizace.

Ve snaze o dosažení nejvyššího zisku je potřeba navrhnout takový typ antény, který bude vykazovat lepší zisk než uvedených -19 dBi resp. -15 dBi. Takto malé zisky jsou dány velmi krátkou vzdáleností mezi zářičem a zemnicí deskou. Proto je potřeba vymyslet návrh, kde by co největší plocha zářiče byla mimo zemnicí desku. Předchozí typy se proto musí upravit. Úprava spočívá v tom, že dojde k umístění největší plochy zářiče mimo zemnicí desku, takže zde nebude nízký zisk z důvodu blízkosti zářiče a zemnicí desky. Výsledný tvar takto namodelované antény je vidět na obrázku 4.14 a 4.15. Rozměry jsou k dispozici v tabulce 4.1. Plocha takto vymodelované antény není tak velká jako při prvním příkladu, ale anténa vykazuje větší zisk při porovnání s prvním i druhým typem antény, což je pro výrobu naší antény klíčový faktor, a proto z tohoto hlediska je nakonec vybrán tento typ antény jako konečný (ten který se bude optimalizovat a používat ve víku). Následuje obrázek modelu antény v CST studiu a její parametry za neoptimalizovaného stavu.

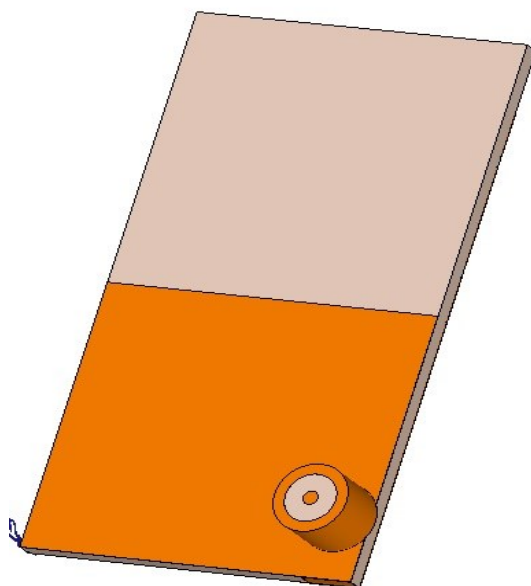
4.2.3 Třetí typ antény



Obrázek 4.14: Konečný tvar PIFA ve víku – pohled shora

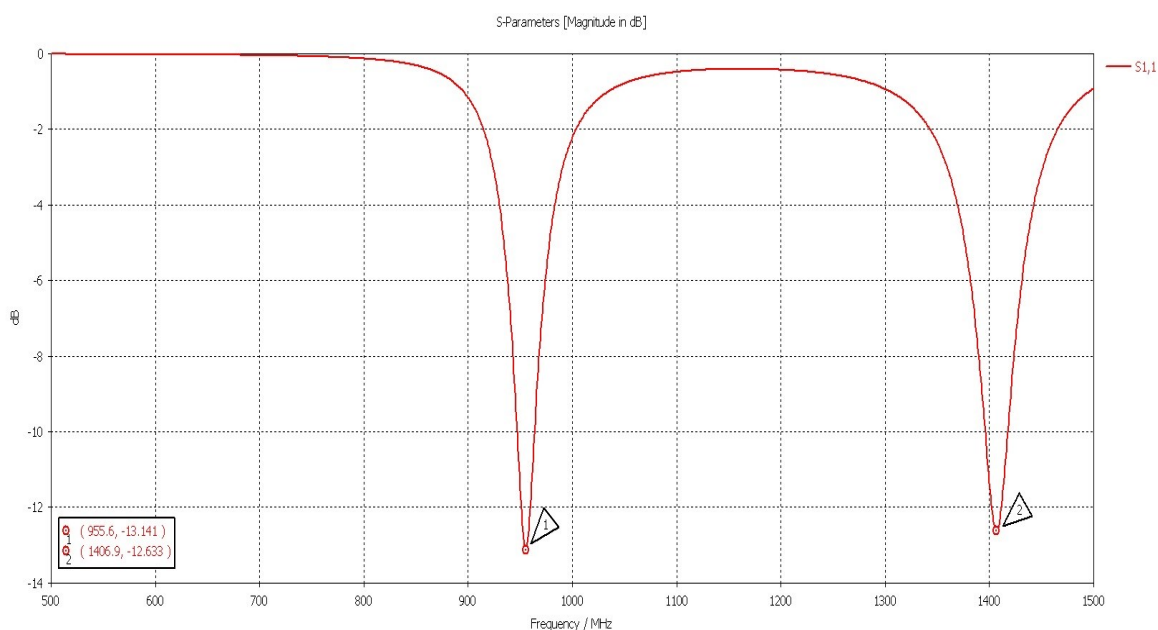
Tabulka 4.1: Rozměry konečného typu PIFA

Lz – Délka zářiče	W - Šířka substrátu	L -Délka substrátu	Wm - Šířka mezery	Wz - Šířka zářiče	Wzk -Šířka zkrat. pinu
156,6 mm	29 mm	51 mm	1 mm	5,2 mm	4,4 mm



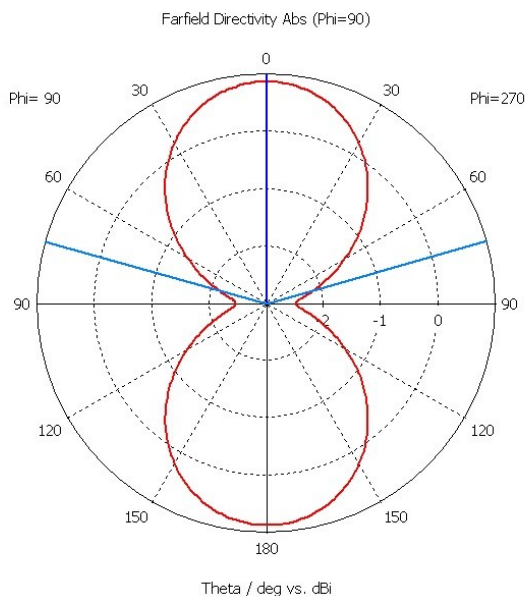
Obrázek 4.15: Konečný tvar PIFA ve víku - pohled zdola

Na obrázcích 4.14 a 4.15 jde vidět finální podoba antény, která bude umístěna v krabici. Dále je zde vidět konektor, který je zatím vymodelován jako přímý. Zemnicí deska byla zkrácena přibližně do poloviny délky L substrátu, a co největší část zářiče tzv. meandr byl umístěn nad místo, kde už se zemnicí rovina nenachází. Toto umístění zářiče mělo největší vliv na zisk. Meandrování je technika prodloužení antény při nedostatku místa, kdy jde o jednoduché zalomení antény takovým způsobem, aby její požadovaná délka byla dostačující na daný kmitočet. Jednotlivé mezery mezi meandry mají šířku 1 mm, šířka zářiče pak 5,2 mm. V pozdější části práce, kdy byla anténa optimalizována, se tyto rozměry ještě změnily na vhodnější pro daný kmitočet.



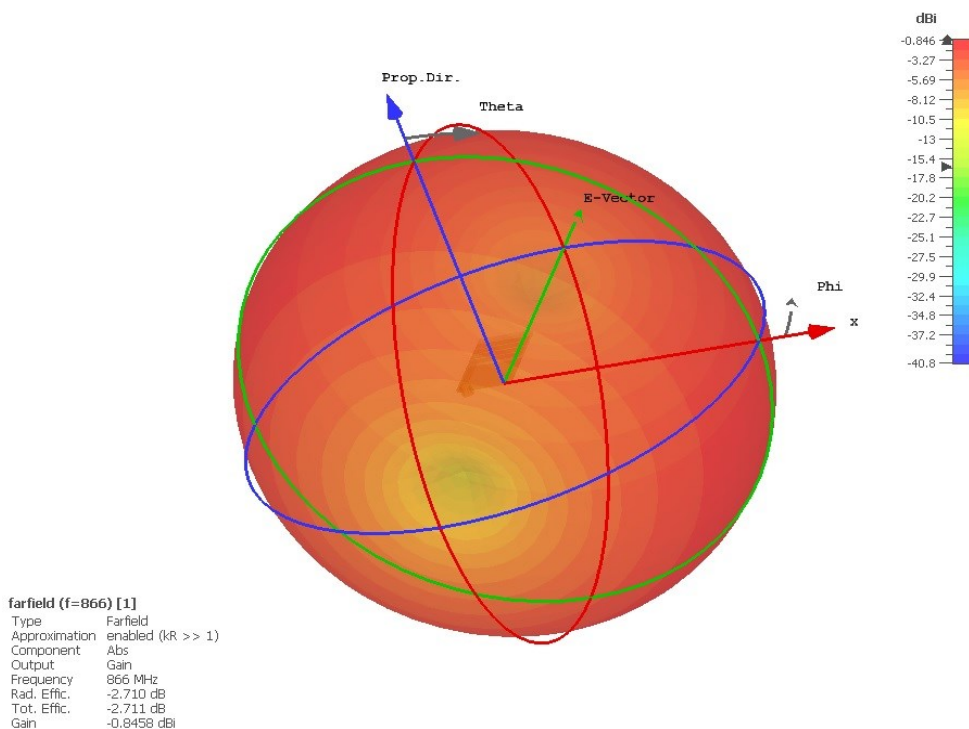
Obrázek 4.16: Frekvenční závislost parametru S_{11} třetího typu PIFA

Na grafu 4.16 jde vidět, že pracovní kmitočet je posunut o 87 MHz nad požadovanou pracovní frekvenci. Anténa vykazuje další rezonanci i na 1,4 GHz. Hodnoty minim S-parametrů se zde liší o -0,5 dB. Anténu tedy bylo nutné optimalizovat na požadovanou frekvenci.



Obrázek 4.17: Směrová charakteristika třetího typu PIFA

Z obrázku 4.18 jde zjistit, že tato anténa může dosáhnout opravdu nejlepšího zisku z vybraných typů, a to konkrétně -0,84 dBi při 866 MHz. Největší podíl vyzařování má anténa směrem nahoru, směrem dolů, stejně tak jako do pravé a levé strany.

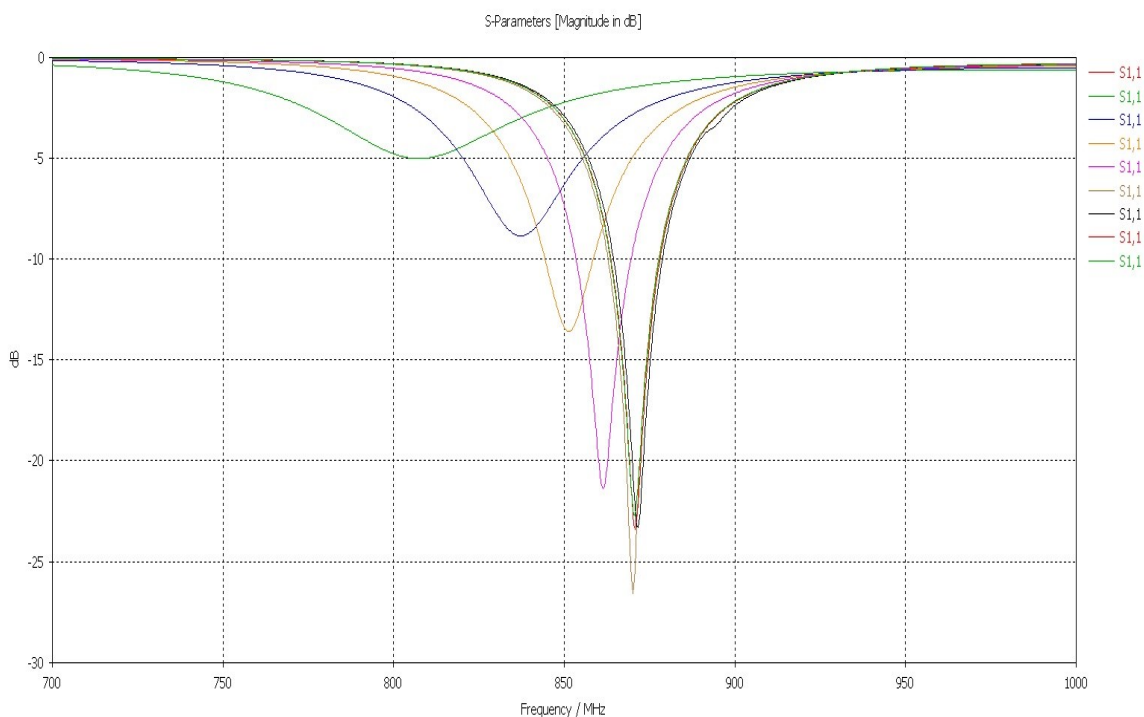


Obrázek 4.18: 3D vyzařovací charakteristika zisku třetího typu PIFA

4.3 Optimalizace antény

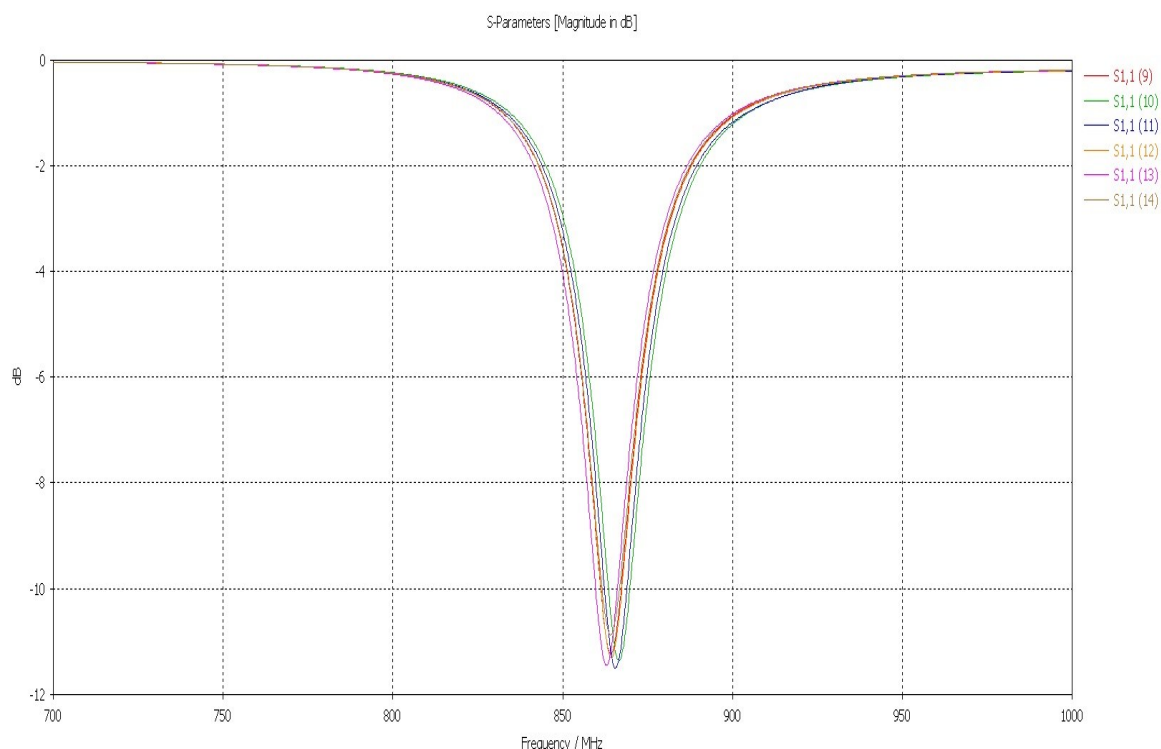
V této kapitole je popsána optimalizace rozměrů PIFA, vedoucí k doladění antény na kmitočet 866,5 MHz a maximalizaci zisku. Délka L a šířka W antény jsou pevně dány rozměrem víka, to znamená, že tyto rozměry antény musí být fixní (nemohou se měnit). Parametry které se mohou měnit jsou: pozice konektoru, šířka zkratovacího pinu W_z a délka meandru (zářiče) L_z . Kdyby byla pozměněna délka L nebo šířka W antény, tak by se anténa již pravděpodobně nevešla do víka. Pro pochopení chování antény byla jako první v programu CST studio použita funkce Parameter Sweep. Tato funkce dovoluje provést několik simulací antény a jejich výsledky zobrazit do jednoho grafu. Uživatel se poté může na jednotlivé výsledky podívat a zjistit jaký vliv má změna určitého parametru na různé typy charakteristik. Další částí optimalizace bylo použití funkce optimizer, která automaticky hledá minima/maxima zadané úlohy pro daný parametr - například hledáním minima v daném rozsahu kmitočtu na S-parametrech apod.

Grafy na obrázcích 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 jsou výstupem funkce Parameter Sweep. Na obrázku 4.19 je znázorněn graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na délce zkratovacího pinu. Počáteční délka zkratovacího pinu byla zvolena na šířku celého flíčku W_z . Bylo zvoleno celkem 9 kroků (zkrácení), pro které se prováděla simulace. Délka jednotlivých zkrácení zkratovacího pinu je 1 mm. Z níže uvedeného grafu je patrné, že se zmenšující se délkou zkratovacího pinu se posunuje minimum S-parametru na stále nižší a nižší kmitočty, a také se zplošťuje jejich tvar. To znamená, že minimum nedosahuje tak nízkých hodnot jako při vyšších kmitočtech. Nejkratší velikost zkratovacího pinu má minimum na 808 MHz a dosahuje hodnoty -5 dB. Při optimalizaci tedy bude nutné zkratovací pin z původní velikosti o něco zvětšit, abychom se dostali na požadovaných 866,5 MHz, což je střední kmitočet pásma g.



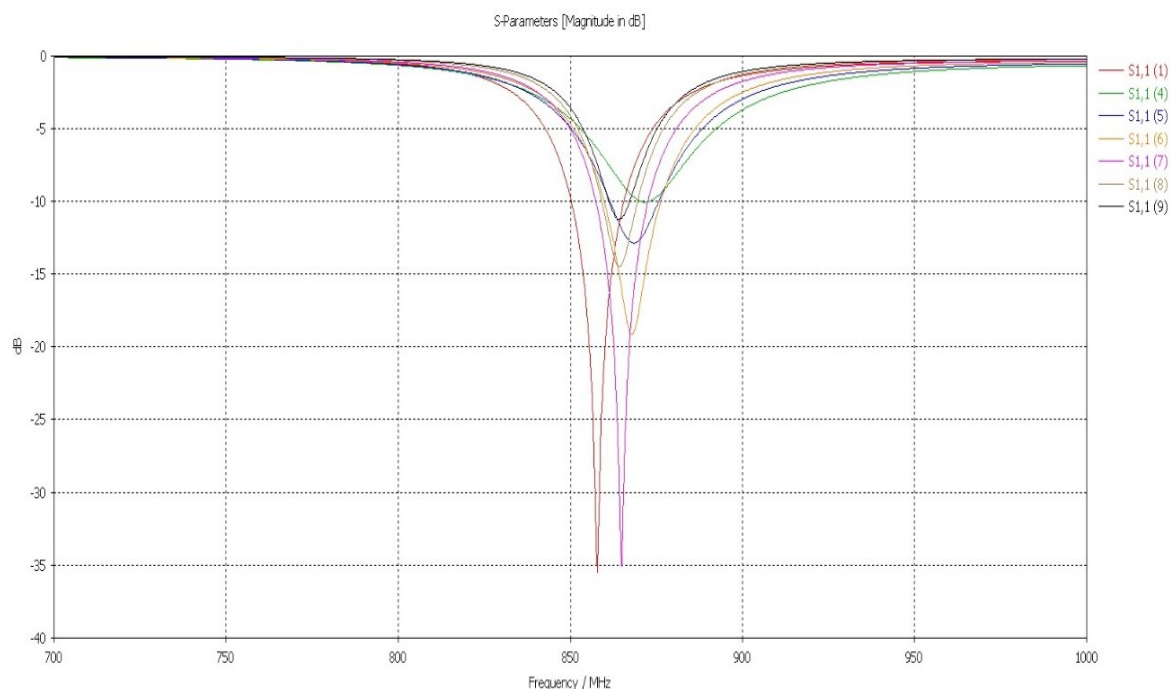
Obrázek 4.19: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na délce zkratovacího pinu

Graf závislosti parametru S_{11} na pozici X konektoru (obrázek 4.20). Zde byla měněna X souřadnice konektoru, tedy poloha konektoru zleva doprava. $S_{11}(9)$ je pozice nejvíce vlevo a $S_{11}(14)$ je pozice nejvíce vpravo. Z grafu je znatelné, že vliv na S_{11} je pouze minimální, kmitočet se liší v jednotkách MHz, hodnota S_{11} se liší v desetínách dB. Tato souřadnice nemá vliv na posun S-parametrů jak do vyšších, tak do nižších kmitočetů, nebo má jen minimální vliv. Při optimalizaci struktury nebude až tolik záležet na pozici x konektoru, což určitě pomůže i při výrobě antény, jelikož při osazování konektoru nebude nutné tolik dbát na X pozici.



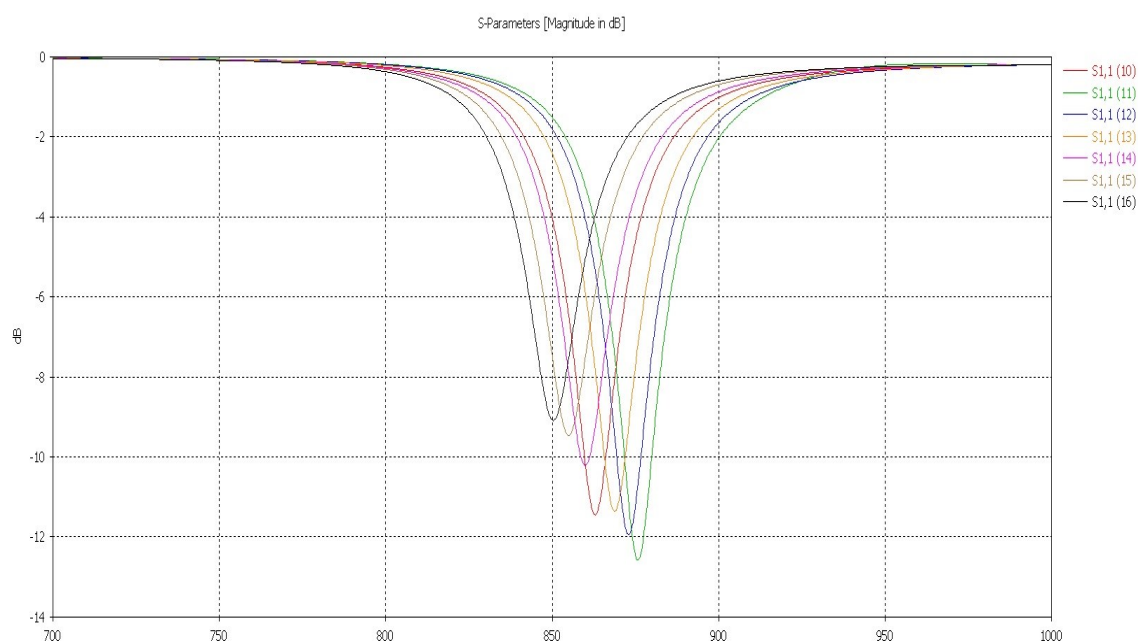
Obrázek 4.20: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na pozici X konektoru

Další studie byla provedena v souvislosti s vlivem pozice Y konektoru na parametr S_{11} . Pozice byla měněna směrem od zkratovacího pinu a ke zkratovacímu pinu. Graf závislosti je znázorněn na obrázku 4.21. $S_{11}(4)$ je pozice Y nejdále od zkratovacího pinu a $S_{11}(9)$ je pozice nejbližší ke zkratovacímu pinu. Nejlepší hodnoty S-parametrů byly dosaženy uprostřed všech prověřovaných hodnot souřadnice Y ($S_{11}(1)$ a $S_{11}(7)$). Pozice Y konektoru se při výrobě bude nacházet blíže zkratovacímu pinu, ale ne moc blízko, protože při velkém přiblížení by došlo ke zhoršení parametrů stejně tak, jako při velkém oddálení. Tento parametr má zásadní vliv na hodnotu parametru S_{11} .



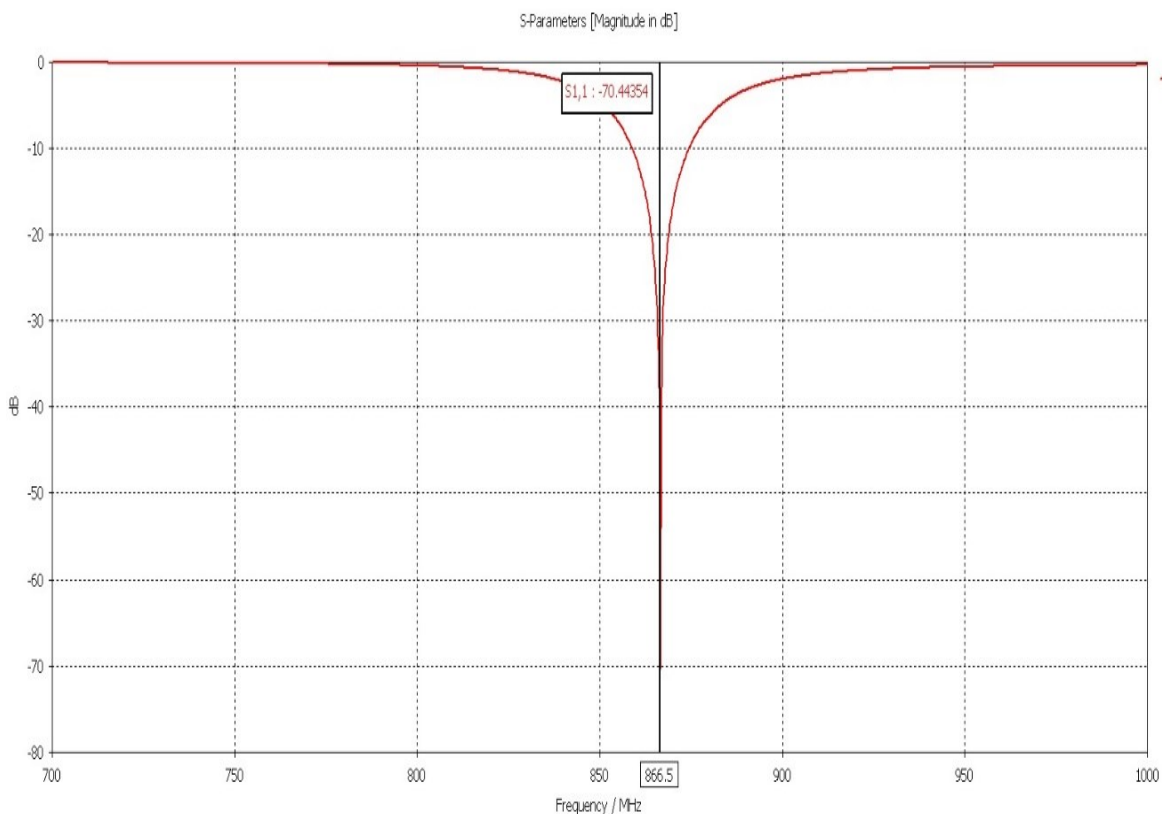
Obrázek 4.21: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na Y pozici konektoru

Poslední studií bylo prověření vlivu délky posledního zahnutí flíčku na parametr S_{11} . Jeho délka byla zvyšována po 1 mm krocích. Celkově bylo provedeno 7 kroků. Z uvedeného grafu 4.22 jde vidět, že druhá nejkratší délka $S_{1,1}(11)$ vykazovala největší propad S-parametrů, a zároveň měla minimum v nejvyšší frekvenci. Postupným zvětšováním této délky dochází ke zhoršení minima S_{11} -parametrů, a také dochází ke snižování frekvence, na které má anténa největší propad. Tento parametr bude zásadní, pokud bude anténa záměrně po výrobě naladěna na vyšší kmitočet a to proto, abychom její kmitočet mohli snížit, jelikož neznáme přesnou permitivitu víka krabičky.



Obrázek 4.22: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} na délce meandru L_z

Dalším krokem bylo použití funkce optimizer v programu CST studio. V této funkci bylo nutno nastavit jaký geometrický parametr při dané frekvenci je potřeba optimalizovat. Graf 4.23 zobrazuje hodnoty optimalizovaných S_{11} -parametrů na kmitočet rovní středovému kmitočtu ISM pásma 868 MHz.

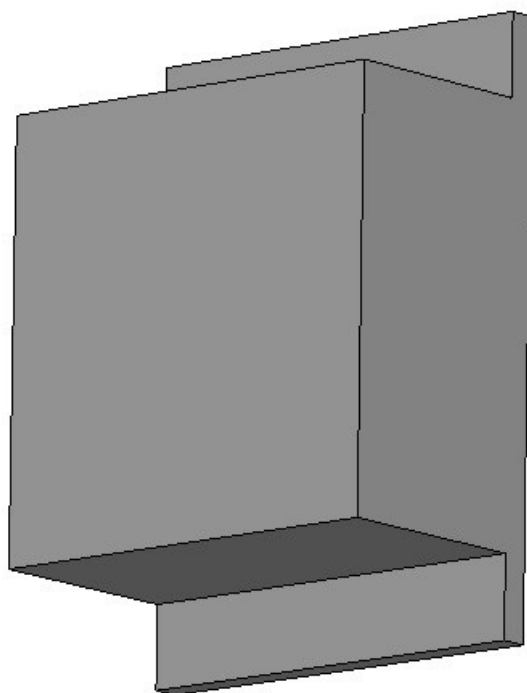


Obrázek 4.23: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} optimalizované PIFA

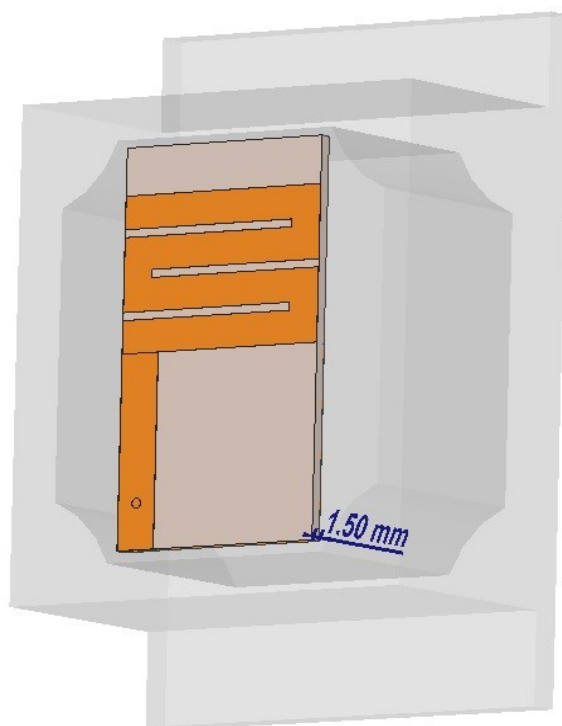
Hodnota S-parametrů dosahuje -70,4 dB na středovém kmitočtu pásma 868 MHz. Co se týče mezních hodnot pásma, tak zde hodnoty S-parametrů dosahují -16 dB, což je stále dostačující podmínka pro PIFA. Na středovém kmitočtu pásma je hodnota PSV rovna 1,00 a v hraničních kmitočtech pásma 1,3 při 863 MHz a 1,31 při 870 MHz, obě tyto hodnoty jsou dostačující pro správný chod antény. Zisk antény na středovém kmitočtu je roven - 0,85 dBi. Hodnoty nejsou konečné, jelikož tyto hodnoty spolu s grafem S-parametrů (obrázek 4.23) jsou hodnoty, které byly optimalizovány pro anténu, která by nebyla umístěna do krabice, ale pracovala by ve volném prostoru. Proto je nutné udělat optimalizaci antény v krabici a až z této druhé optimalizace zjistíme přesnější parametry antény, které se více přibližují reálnému prostředí, kde bude anténa umístěna.

4.3.1 Optimalizace rozměrů antény uvnitř ABS krabice

Následuje optimalizace PIFA v krabici, a to proto, abychom se co nejvíce přiblížili parametrům antény v simulaci. Byl vymodelován model krabice, materiál je ABS s relativní permitivitou 2,9. V důsledku neznalosti přesných parametrů materiálu krabice byly použity střední hodnoty ABS materiálu. Krabice je v měřítku 1:1.

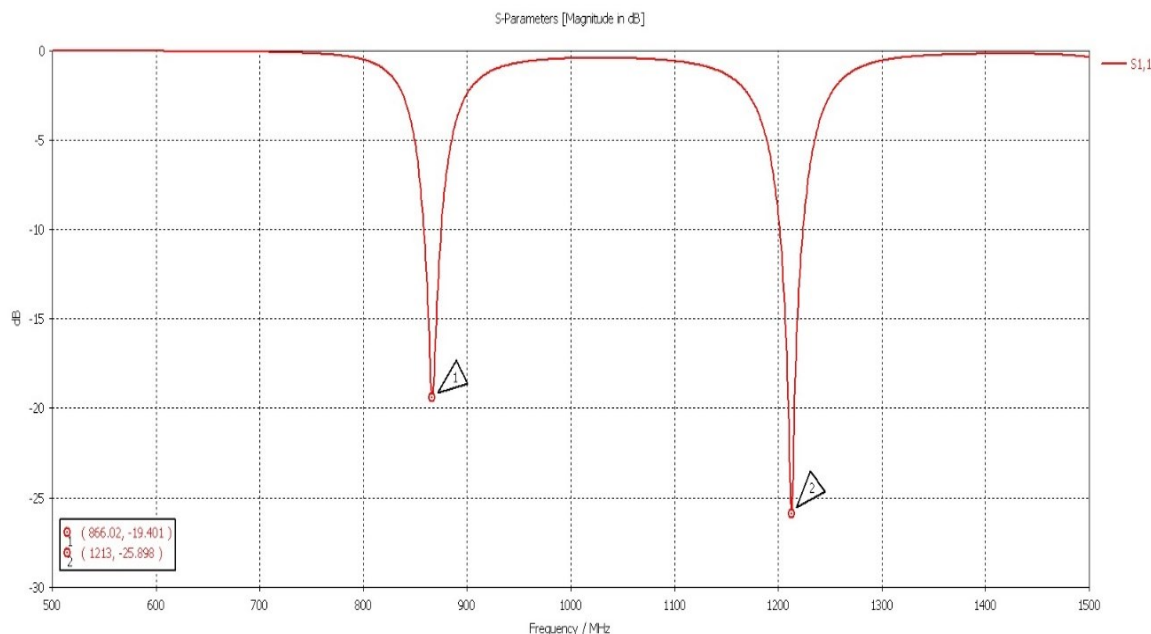


Obrázek 4.24: Model krabičky v CST studiu



Obrázek 4.25: Pozice antény v ABS krabičce

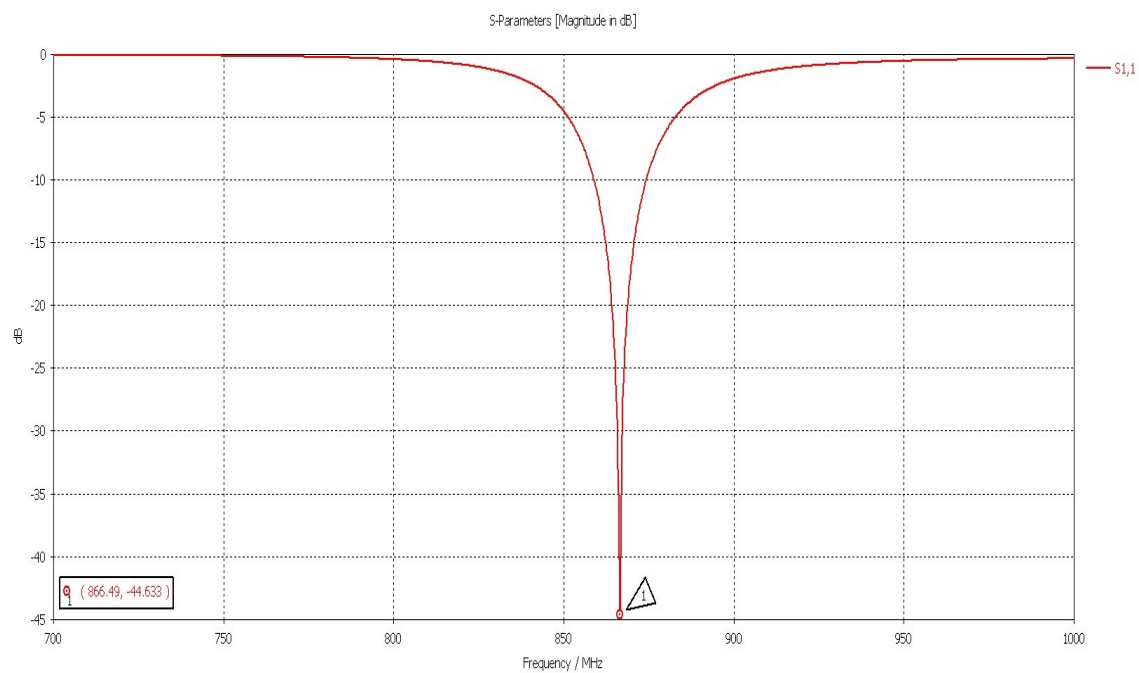
V krabici se bude nacházet velká baterie, která vyplní prakticky celou plochu uvnitř krabíčky. Jelikož by se do zbylých malých míst anténa špatně umísťovala, nejlepší řešení je umístit anténu do víka, resp. přilepit anténu na víko v krabici. Víko značně ovlivní S_{11} -parametry. Jako první byla provedena simulace S_{11} -parametrů antény po vložení do krabíčky. Anténa má stejné parametry (rozměry) jako před vložení do krabíčky. Výsledky simulace jsou znázorněny na obrázku 4.26.



Obrázek 4.26: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} antény v krabici

Při porovnání tohoto grafu s grafem 4.16, jde vidět, že došlo k propadu parametru S_{11} . Propad při 1,2 GHz se zmenšil o -13 dB, zatímco první propad při 866 MHz se zmenšil pouze o -6 dB. Daleko citlivější na krabíčku se jeví rezonance na 1,2 GHz. Vložení antény do krabíčky, mělo také vliv na pracovní frekvenci, kdy první rezonance (866 MHz) se posunula o 90 MHz, a druhá rezonance se posunula o 200 MHz níže. Anténu tedy bude nutné optimalizovat v krabici, a poté se až tento optimalizovaný model bude vyrábět, a to z toho důvodu abychom dosáhli co nejlepších parametrů. Protože není přesně známa permitivita víka, bylo navrženo místo, kde se nenachází zářič. Toto místo bude sloužit pro případné prodloužení antény, pokud by se umístěním do krabíčky S-parametry objevily na vyšších kmitočtech. Místo se také může zkracovat, což bude mít také vliv na přeladění S-parametrů, ale k vyšším kmitočtům.

Obrázek 4.27 je graf parametru S_{11} , tentokrát již optimalizované antény umístěné do krabíčky. Optimalizace byla prováděna pouze pro kmitočet 866,5 MHz. Parametr S_{11} již nedosahuje po optimalizaci -70 dB, jako tomu bylo v případě bez krabíčky, ale dosahuje -44,6 dB. Krabíčka má tedy citelný vliv na propad parametru S_{11} .



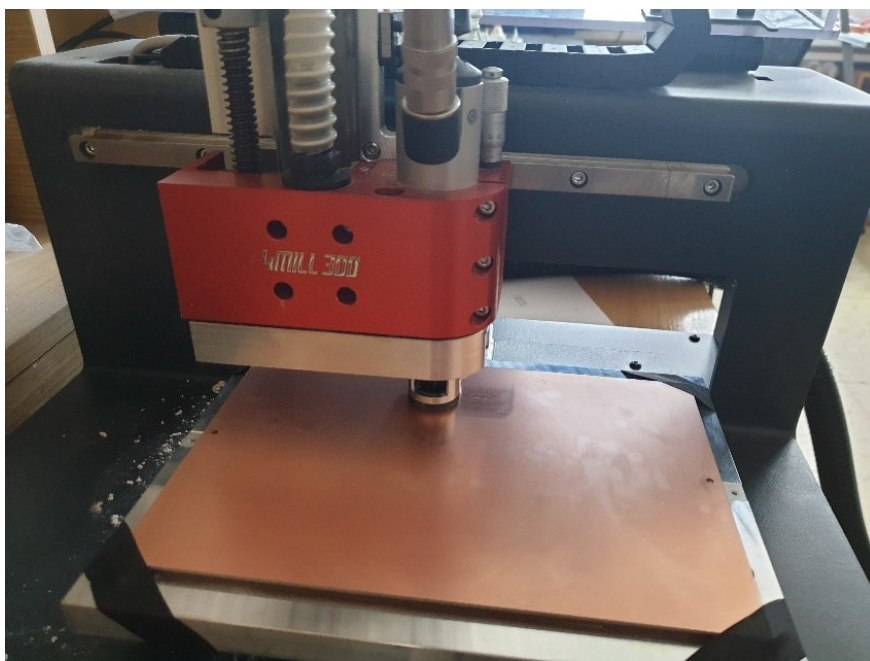
Obrázek 4.27: Graf frekvenční závislosti parametru S_{11} optimalizované PIFA v krabičce

5 Výroba antény

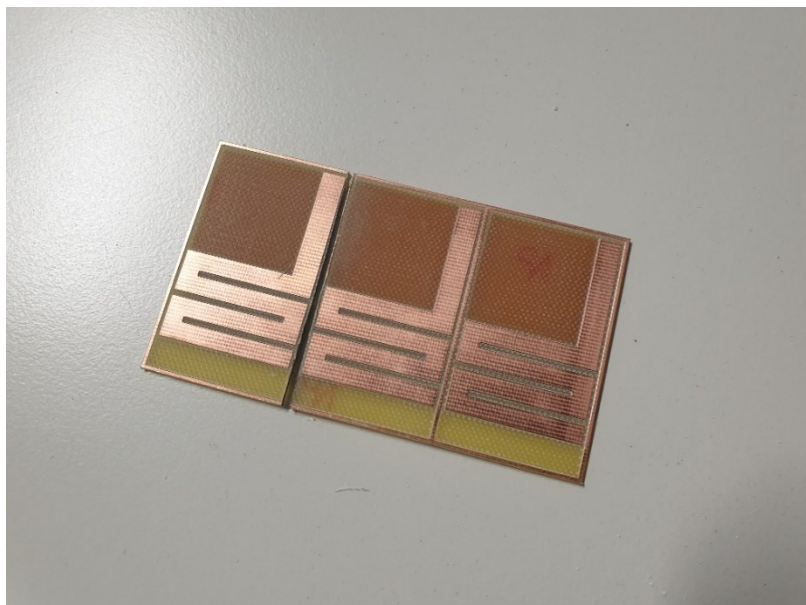
Jako materiál pro výrobu antény byla zvolena deska FR4 s tloušťkou 1,5 mm. Tento materiál je laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí, pokrytý z obou stran 35μm vrstvou mědi. Pro výrobu antény byla použita frézka 4MILL300.

Nejdříve bylo nutné pomocí CST studia převést souřadnice do vhodného formátu, frézka podporuje několik formátů, pro frézování byl zvolen formát gerber. CST studio disponuje funkcí **import**, kde pomocí možností – **2d files – Gerber (Single layer)** byla převedena zvolená plocha do gerber souboru s příponou „.gbr“. Jelikož tato funkce převede pouze jednu plochu, byl tenhle převod proveden celkem třikrát, a to pro zářič, zemnicí desku a dielektrikum. Poté už je možné tyto soubory vložit do profesionálního programu TrackMaker, který používá frézka pro výrobu plošných spojů. Soubory byly importovány, nastaveny patřičné parametry, například jaký soubor bude na jaké straně desky a poté byly vzorky vyfrézovány. V programu je i možnost odstranit přebytečnou měď. Po skončení frézování může být hotový výrobek odebrán. Ukázku výroby antény na frézce je možné vidět na obrázku 5.1.

Protože přesná permitivita krabičky nebyla známa, tak byly vždy vyrobeny tři testovací vzorky vedle sebe, které se dále musely opracovat. Ukázka takto vyrobených vzorků je na obrázku 5.2. Byla zde vyfrézována tenká linka mezi vzorky, která slouží pro rozdělení jednotlivých vzorků pomocí pilky. Následné ostré hrany, které vznikly po rozřezání jednotlivých vzorků, byly dobroušeny, popř. přebytečný materiál dielektrika byl upilován a následně také dobroušen.



Obrázek 5.1: Ukázka výroby antény na frézce

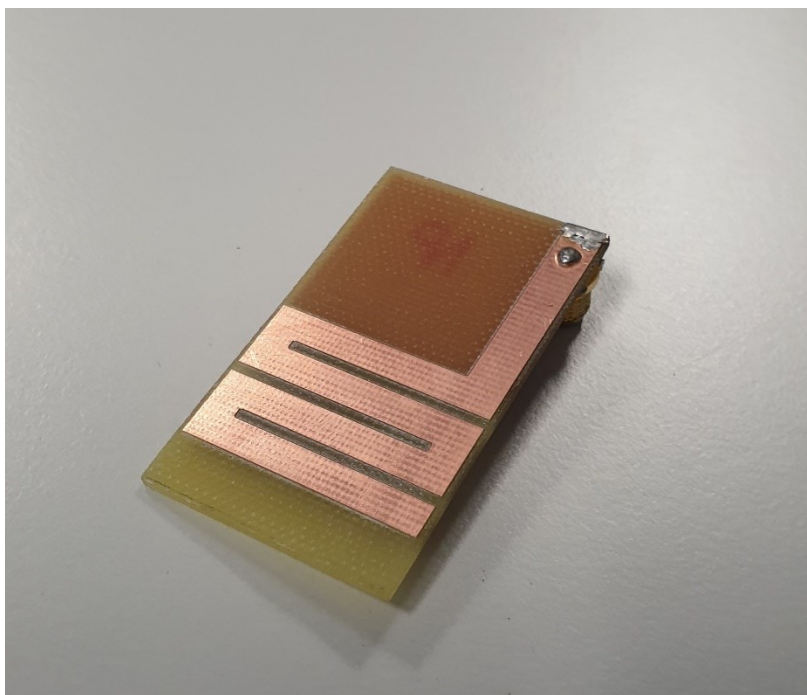


Obrázek 5.2: *Tři vyfrézované vzorky antény*

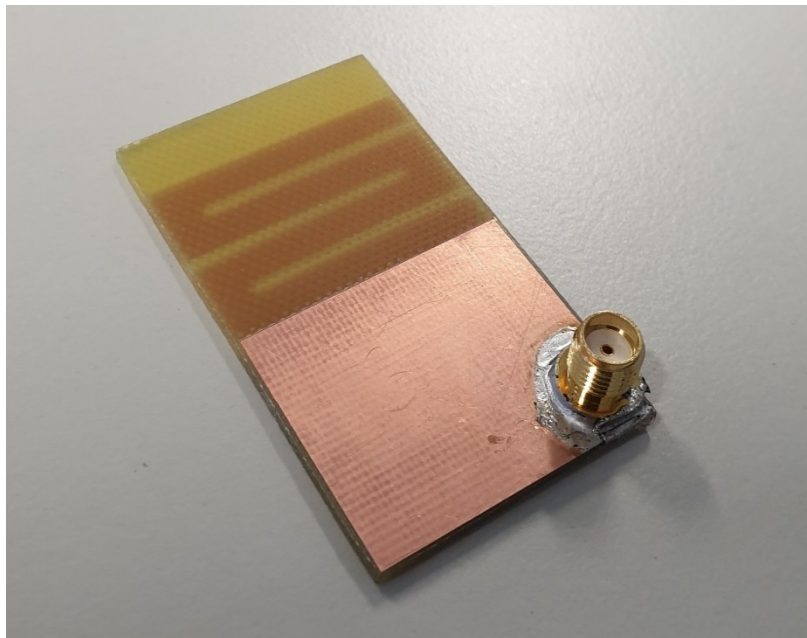
Dalším krokem je osazení SMA konektoru, který je vidět na obrázku 5.3. Následuje výroba zkratovacího pinu, ten je vyroben z měděné pásky o šířce 9 mm vystřížením a následným připájením na zemnicí desku a zářič antény. Velikost zkratovacího pinu, byla nejdříve zvolena na celou šířku s tím, že v rámci naladění antény na daný kmitočet se tato velikost zkracovala, a to pomocí řezání. Anténa má na vrchní straně místo, na kterém se nenachází měď, toto místo se může obrousit nebo se na něho může nanést další měď (čímž by se anténa prodloužila), a díky tomu se anténa může naladit na vyšší nebo na nižší kmitočty, jelikož jak bylo zjištěno v simulacích, tak rozměry dielektrika mají také vliv na naladění antény. Pozice konektoru se po připájení již nemůže změnit, proto tento parametr zůstane konstantní. Měnit se může délka antény, rozměry dielektrika a velikost zemnicí desky. Vyrobenou anténu je možné vidět na obrázcích 5.4 a 5.5.



Obrázek 5.3: *SMA konektor pro montáž na PCB*



Obrázek 5.4: Vyrobená anténa - horní strana (fliček)

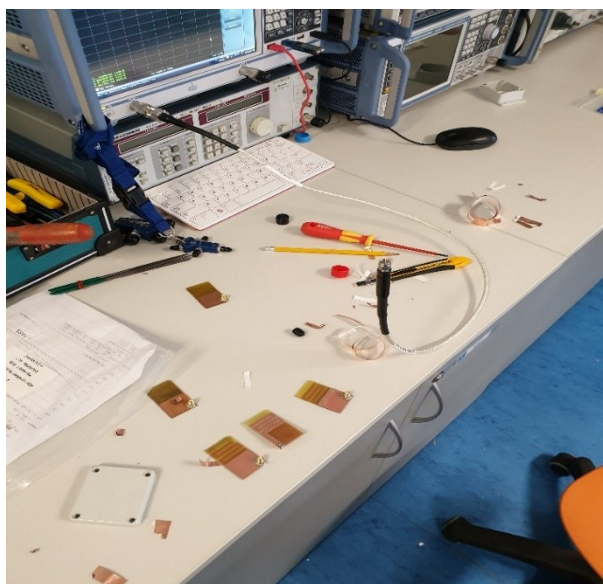


Obrázek 5.5: Vyrobená anténa - spodní strana (zemní rovina)

6 Měření antény

Tato kapitola se zabývá ověřením vlastností antény pomocí měření, dále vyhodnocením naměřených hodnot, měřením zisku a porovnáním skutečných hodnot parametru S_{11} s nasimulovanými hodnotami.

Pro měření vlastností antény byl použit vektorový analyzátor od firmy Rohde&Schwarz typu ZND8. Anténa byla připojena pomocí SMA kabelu. Při prvotním měření dosahovaly hodnoty parametru S_{11} vyšších kmitočtů než výsledky simulace. To bylo zapříčiněno neznámou permitivitou krabičky i dielektrika antény (permitivita dielektrika se na trhu objevuje v určitém rozmezí, proto bylo vyrobeno více vzorků antény). Po vložení prvního vzorku do krabičky dosahovaly hodnoty parametru S_{11} minima -6 dB na frekvenci 881 MHz. Takto malý propad byl způsoben velikostí zkratovacího pinu, který byl vždy při sestavení vzorku antény zkonstruován na celou šířku zářiče. V rámci naladování docházelo ke zkracování tohoto zkratovacího pinu pomocí nožíku, kdy byl vždy odřezán kousek zkratovacího pinu a následně se odečetlo minimum parametru S_{11} , pokud minimum bylo pořád na vyšším kmitočtu, tak se pokračovalo v odřezávání zkratovacího pinu, a to až do délky zkratovacího pinu, která byla zjištěna jako nejvhodnější při optimalizaci v programu CST. Pokud minimum parametru S_{11} nebylo stále na požadovaném kmitočtu, tak se brousila hrana, kde se nenachází zářič, což mělo také vliv na posun parametru S_{11} , a také toto obroušení mělo znatelný vliv na propad těchto parametrů. V případě, že ani pomocí tohoto postupu nedošlo ke správnému naladění antény, tak došlo ke změně rozměrů zemnicí desky. Ke změně rozměrů došlo pomocí frézky, kdy se vyfrézoval nový vzorek s např. delší zemnicí deskou o 0,1 mm a postup se opakoval znovu, dokud nebyla anténa naladěna na správný kmitočet. Na obrázku 6.1 je ukázka pracoviště při měření antény.



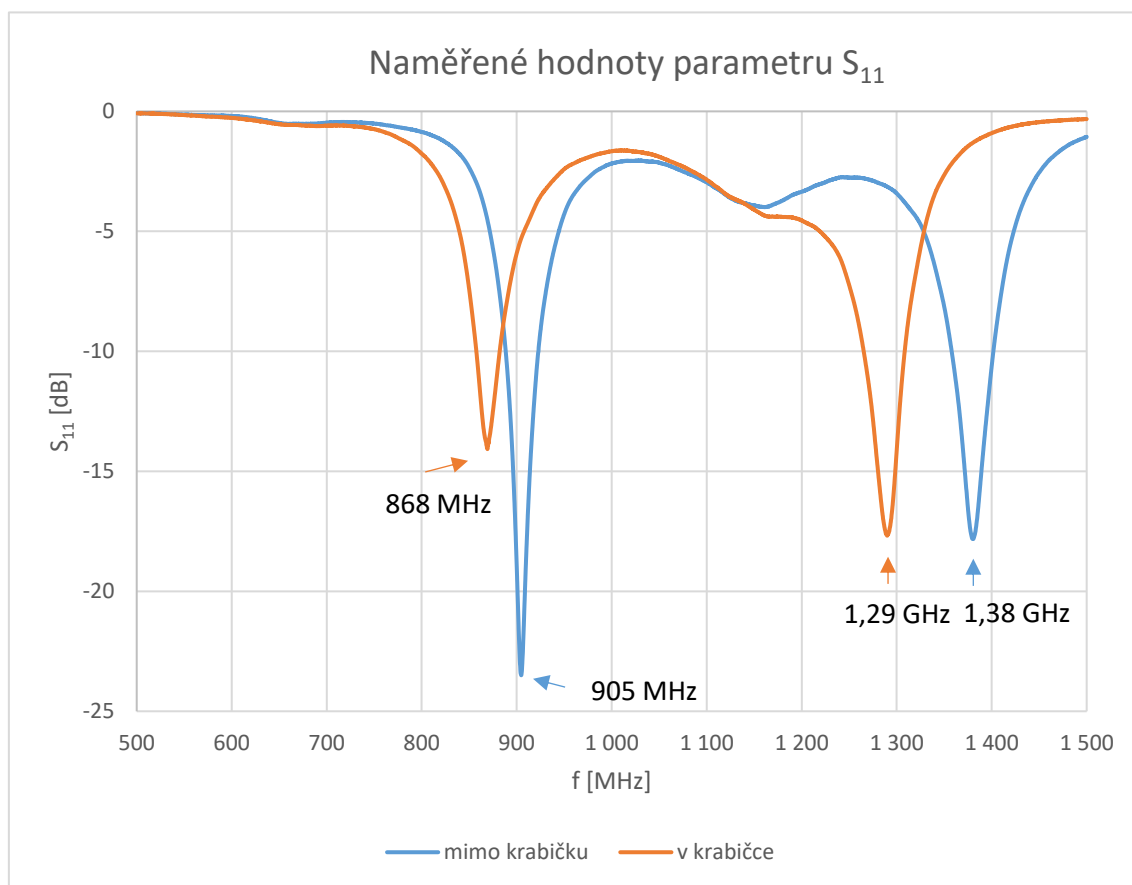
Obrázek 6.1: Ukázka pracoviště

Pro měření zisku byla použita jednoduchá porovnávací metoda. Kdy signál získaný z antény s neznámým ziskem je porovnán s anténou, jejíž zisk známe (např. referenční trychtýřová anténa). Nejdříve byla změřena výkonová úroveň antény se známým ziskem (typ DRH 10), poté byla změřena výkonová úroveň antény s neznámým ziskem. Z porovnání těchto

hodnot byl určen zisk antény. Zisk antény činil -10 dBi. Tato hodnota je v porovnání se simulovaným ziskem o cca 9 dB horší. Výsledek měření je pouze orientační, jelikož anténa nebyla měřena v bezodrazové komoře a při měření mohla vzniknout chyba. Na snížení zisku má určitě vliv i možnost jiných parametrů substrátu a z velké části také krabíčka, do které je anténa umístěna. Jako generátor signálu byl použit přístroj od firmy Rohde&Schwarz typu SMB 100A, jako spektrální analyzátor byl použit přístroj od stejnojmenné firmy typu FSH 8.

6.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

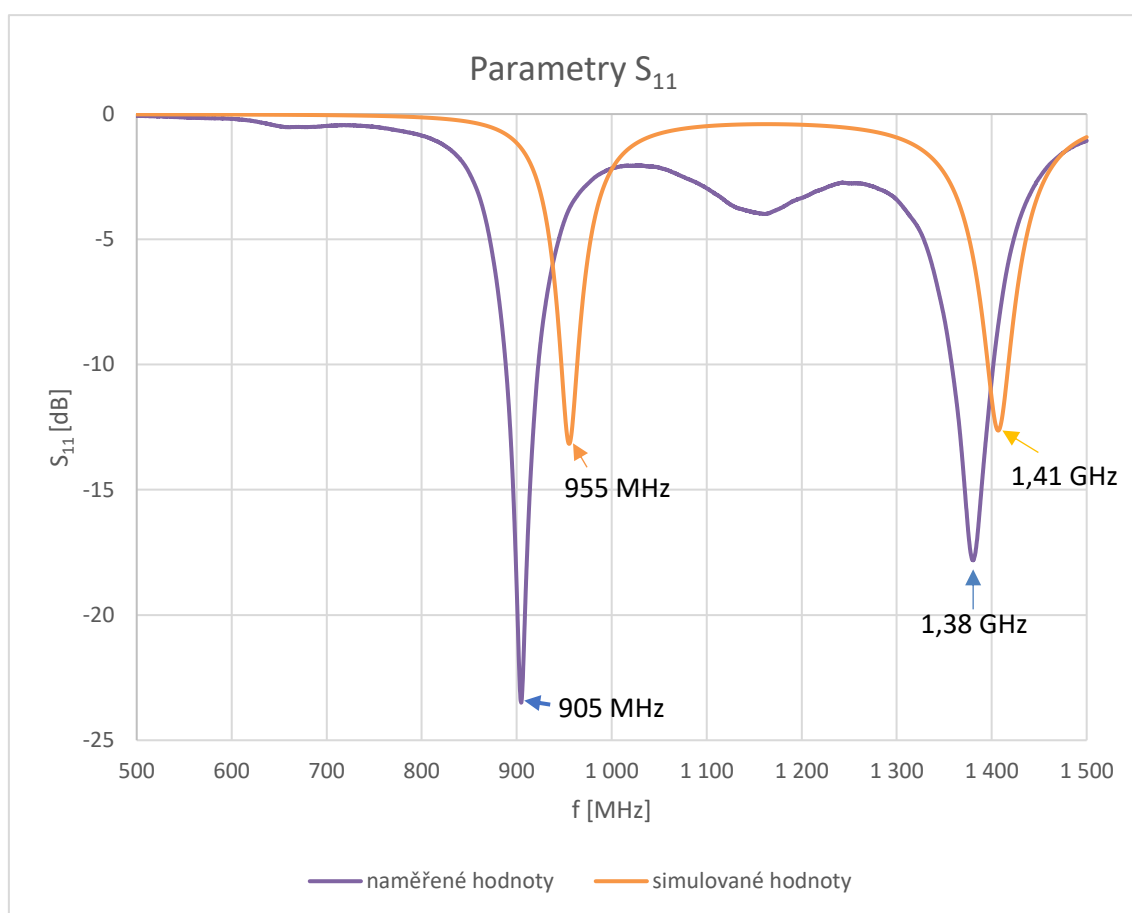
Po veškerém doladění byla anténa odměřena nejdříve bez krabíčky, a poté po vložení do ABS krabíčky. Při měření bez krabíčky dosahovaly hodnoty parametru S_{11} dvou minim, a to konkrétně -23,5 dB při frekvenci 905 MHz a -17,7 dB při frekvenci 1,38 GHz. Po vložení antény do krabíčky anténa vykazovala znovu dvě minima, a to -14,1 dB při frekvenci 868 MHz, -17,6 dB při 1,29 GHz. Při krajních hodnotách ISM pásma 868 MHz anténa po vložení do krabíčky vykazovala následující parametry, při 863 MHz byla hodnota parametru S_{11} rovna -12,5 dB a při frekvenci 870 MHz byla hodnota rovna -13,8 dB. Aby planární antény fungovaly, tak je nutnou podmínkou mít v celé šířce pásma hodnotu parametru S_{11} menší než -10 dB. V případě mé antény se hodnota parametru S_{11} v celé šířce pásma nedostane nad -12,5 dB, což znamená, že podmínky pro fungování antény na zadaném kmitočtovém pásmu jsou splněny. Na obrázku 6.2 je ukázka naměřených parametrů na vektorovém analyzátoru. Po vložení antény do krabíčky došlo ke zvětšení parametru S_{11} , stejně tak jako k jeho posunu k nižším kmitočtům.



Obrázek 6.2: Naměřený parametr S_{11} bez krabíčky a v krabíčce

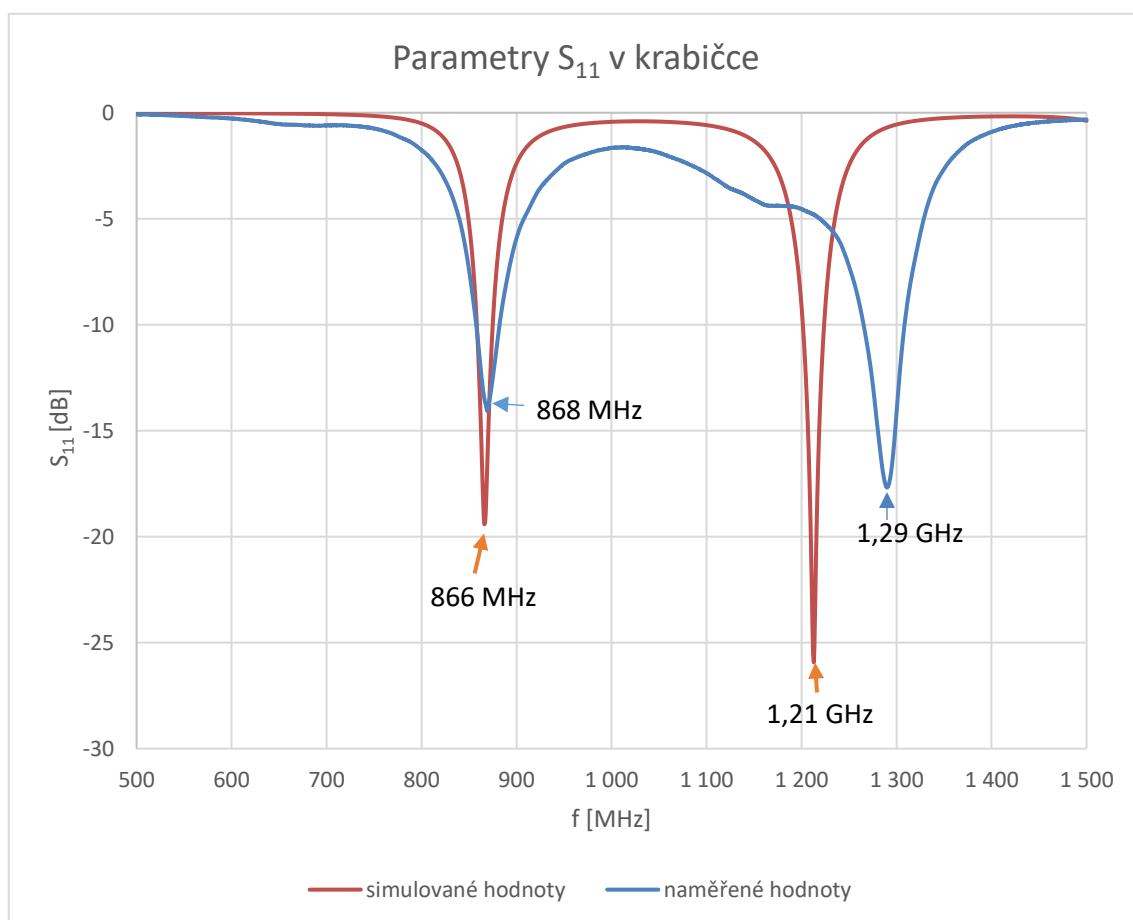
6.2 Porovnání naměřených hodnot se simulovanými

Pro porovnání naměřených a simulovaných hodnot jsou použity simulace z CST studia, které jdou vidět na obrázcích 4.17 a 4.27. Jsou použity simulace neoptimalizovaných antén, a to z toho důvodu, že tyto simulace lépe vystihují reálné prostředí na rozdíl od optimalizovaných simulací. Naměřené hodnoty antény bez krabice nelze porovnat s optimalizovanou simulací bez krabice, protože anténa byla v simulaci optimalizována na středový kmitočet pásma 868 MHz. Zatímco realizovaná anténa byla navržena pro použití do krabice. Z tohoto důvodu mají hodnoty minimu parametru S_{11} na rozdílných frekvencích. První je porovnání simulace antény bez krabice a naměřených hodnot antény bez krabice. Porovnání je zobrazeno na obrázku 6.3. Z tohoto obrázku jde zjistit, že naměřené parametry doladěné antény vykazovaly menší parametr S_{11} než simulované parametry. Je to z toho důvodu, že naměřené hodnoty patří anténě, která byla doladěována na co nejnižší hodnotu parametru S_{11} . Hodnoty tohoto parametru jsou lehce posunuty do nižších kmitočtů než na simulaci, což je způsobeno dobroušením hran a dalšími úpravami. Anténa vykazuje větší rezonanci na kmitočtu 905 MHz.



Obrázek 6.3: Porovnání naměřených a simulovaných parametrů S_{11}

Druhé porovnání je porovnání simulovaných hodnot a naměřených hodnot antény po vložení do krabičky. Z obrázku 6.4 je možné zjistit, že došlo ke značnému zvětšení hodnot parametru S_{11} . Anténa vykazuje naopak větší rezonanci na vyšším kmitočtu (1,29 GHz), než tomu bylo bez krabičky. Propad na vyšším kmitočtu je posunut o 80 MHz směrem k vyšším kmitočtům vůči simulovaným hodnotám. Anténa je naladěna na požadované ISM pásmo, a v krajních hodnotách tohoto pásma (863 a 870 MHz) má hodnotu parametru S_{11} menší než -10 dB resp. hodnotu PSV menší než 2, stejně tak jako v celé šířce tohoto pásma, a proto po naměření veškerých parametrů a jejich vyhodnocení lze usoudit, že tato anténa splňuje požadavky pro použitelnost v ISM pásmu 868 MHz v krabičce. Obrázek 6.4 ukazuje porovnání naměřených a simulovaných parametrů S_{11} v krabičce.



Obrázek 6.4: Porovnání naměřených a simulovaných parametrů S_{11} v krabičce

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat inverzní planární F-anténu pro kmitočtové pásmo 868 MHz. V teoretické části jsem se věnoval anténě jako takové a jejími základními vlastnostmi. Poté jsem se zaměřil na základní definici planárních antén, jejich vzhled a dělení. V poslední kapitole teoretické části jsem popsal pásmo, ve kterém bude anténa pracovat a komunikační síťový protokol resp. systémovou síťovou architekturu, která se na tomto pásmu používá. V praktické části jsem pomocí vzorců vypočítal přibližnou velikost antény, následně vybral dva základní typy a ověřil jejich vlastnosti. Při výpočtu musely být brány v potaz rozměry ABS krabičky, ve které je anténa umístěna. Při ověřování vlastností v programu CST studio jsem došel k závěru, že antény vykazovaly velice malý zisk v porovnání s teoretickými předpoklady. Bylo to zapříčiněno malou vzdáleností mezi zemnicí deskou a zářičem. Navrhnul jsem proto model antény, kde se pod největší částí zářiče nenachází zemnicí deska, a díky této vlastnosti model již vykazoval odpovídající zisk. Následně jsem provedl několik studií ohledně jednotlivých parametrů antény, jako jsou délka zkratovacího pinu, pozice konektoru apod. Informace z těchto studií jsem použil při naladění antény na správný kmitočet. Před výrobou byl model antény postupně optimalizován. Anténa byla vyrobena pomocí frézky 4MILL300 a v důsledku neznámé permitivity krabičky byla doladěna na správný kmitočet. Výsledky měření ukázaly, že hodnota parametru S_{11} je v celé šířce pásma nižší než -10 dB, což je nutná podmínka pro správnou funkci planární antény. Tuto podmínku anténa splňuje a nejnižší hodnota parametru S_{11} (v požadovaném pásmu) je rovna -14,1 dB. Vyhотовená anténa pracuje v kmitočtovém pásmu 868 MHz.

Použitá literatura

- [1] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design. 3rd ed.* Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 0-471-66782-x. [cit. 2019-09-20]
- [2] Dvorský, Marek. *Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB - TUO*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3557-0 [cit. 2019-09-20]
- [3] RODRIGO, Ranga. *Fundamental parameters of antennas* [online]. 2010 [cit. 2019-09-21].
Dostupné z: [http://papaers.aast.edu/staffcourses/66_10285_EC442_2015_1__1_1_1_antenna %20parameters.pdf](http://papaers.aast.edu/staffcourses/66_10285_EC442_2015_1__1_1_1_antenna%20parameters.pdf)
- [4] AUTOR NEUVEDEN, cs.wikipedia.org [online]. [cit. 2019-9-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C3%AD%C5%99ka_p%C3%A1sma#/media/File:Bandwidth_2.svg
- [5] prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida a kolektiv, *Multimediální učebnice elektromagnetických vln a mikrovlnné techniky.*, [cit. 2019-09-27]. FEI VUT v Brně. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [6] *Vícepásmová anténa pro bezdrátovou počítačovou komunikaci* [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18940.
Bakalářská práce
- [7] CHEN, Zhi Ning a Michael Y. W. CHIA. *Broadband planar antennas: design and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2006. ISBN 0-470-87174-1. [cit. 2019-09-27]
- [8] LoRa Alliance. *LoRaWAN What is it?: A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. San Ramon: LoRa Alliance [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf
- [9] VO-R/10/01.2019-1. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/01.2019-1: k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. Praha: Český telekomunikační úřad, 2019 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/01.2019-1/obrazky/vo-r10-012019-1.pdf>
- [10] THEORY, Antenna. PIFA - The Planar Inverted-F Antenna. [Http://www.antenna-theory.com](http://www.antenna-theory.com) [online]. 2016 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/pifa.php>
- [11] THEORY, Antenna. PIFA - The Planar Inverted-F Antenna. [Http://www.antenna-theory.com](http://www.antenna-theory.com) [online]. 2016 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>

Seznam příloh

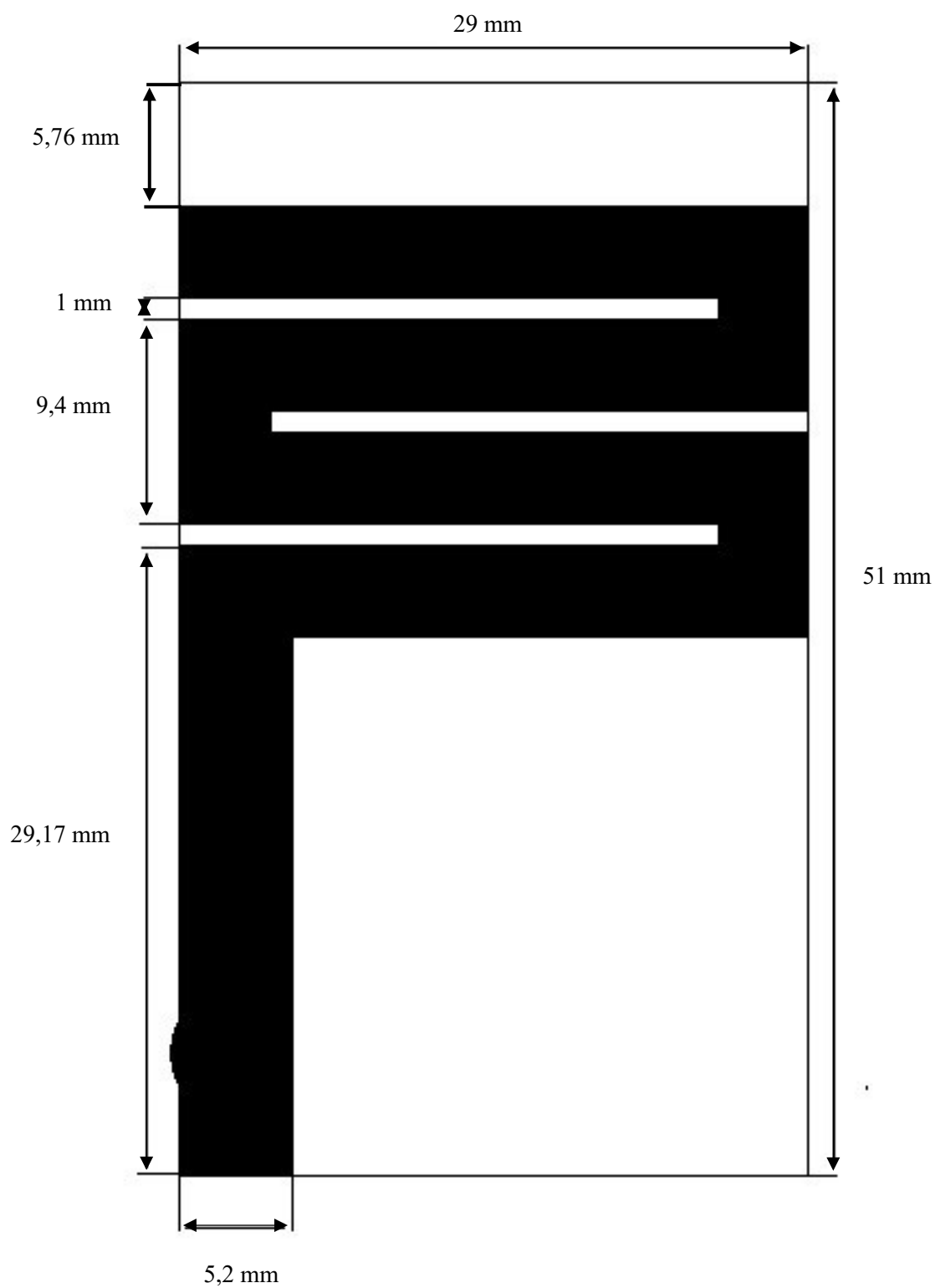
Obsah elektronické přílohy:

- PIFA_bez_krabicky.cst
- PIFA_v_krabicce.cst

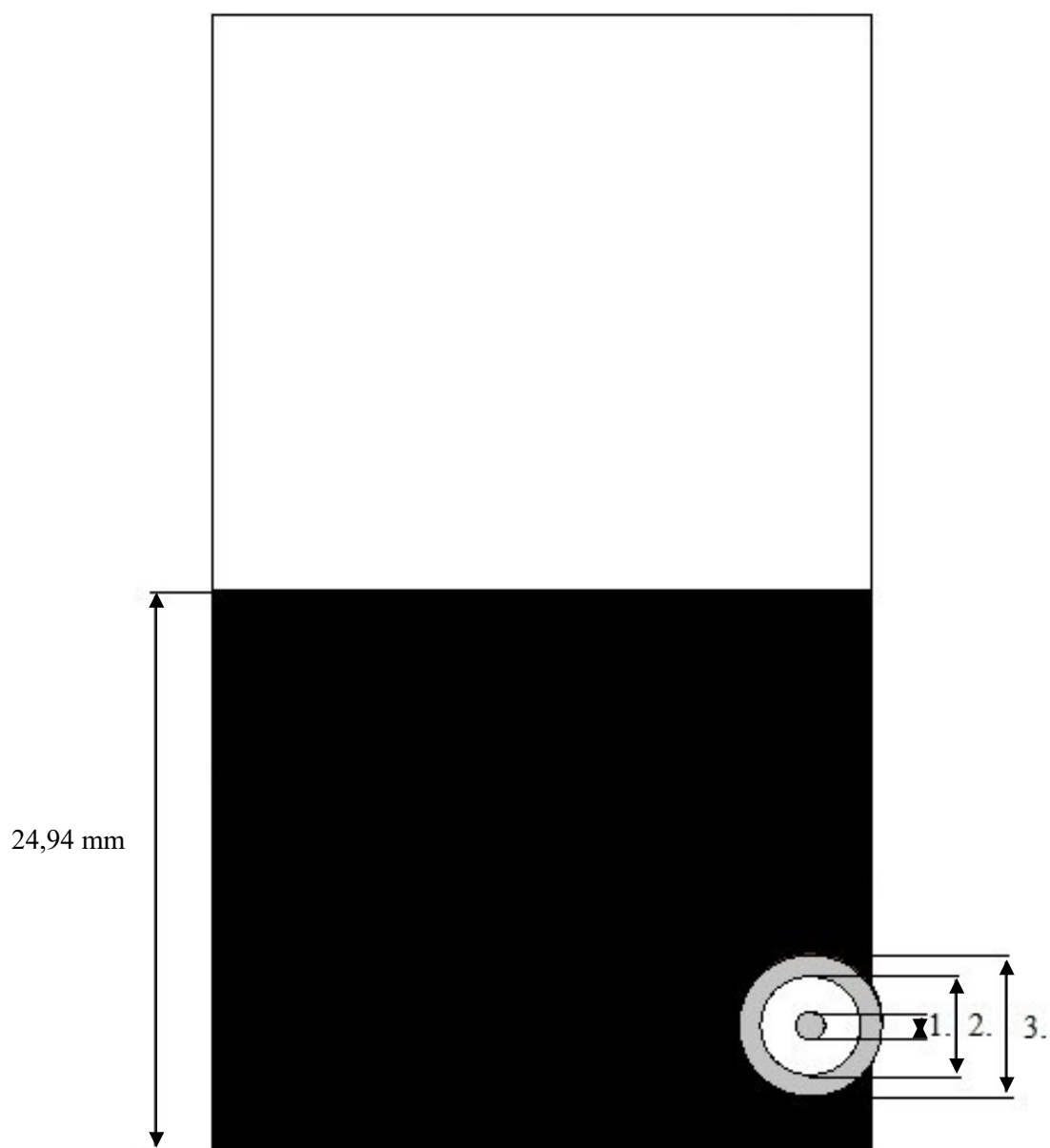
Obsah tištěné přílohy:

A. Okótovaný model antény a krabičky.....	III
B. Měření antény.....	VII
C. CST	XI

A. Okótovaný model antény a krabičky



Obrázek A.1: Okótovaný model PIFY – pohled shora

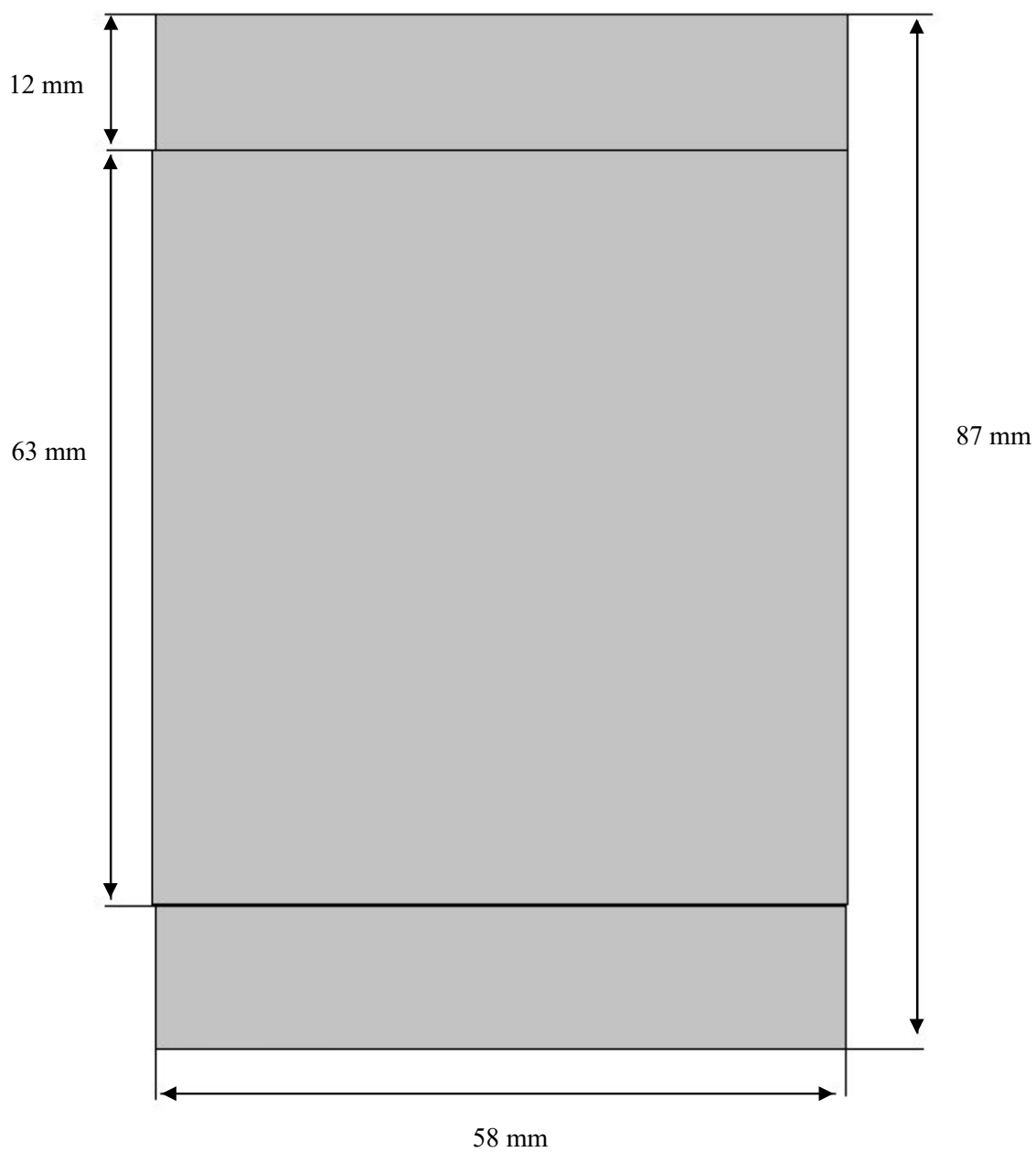


Obrázek A.2: Okótovaný model PIFY- pohled zdola

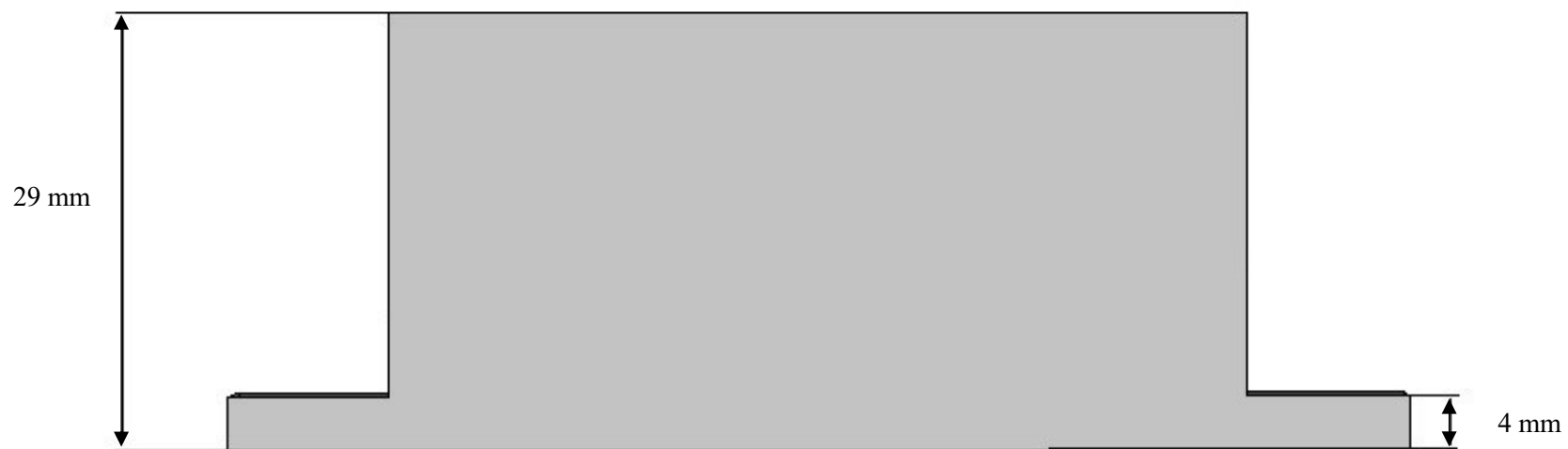
1. - 1,27 mm

2. - 4,4 mm

3. - 6,3 mm



Obrázek A.3: Okótovaný model krabičky - pohled shora

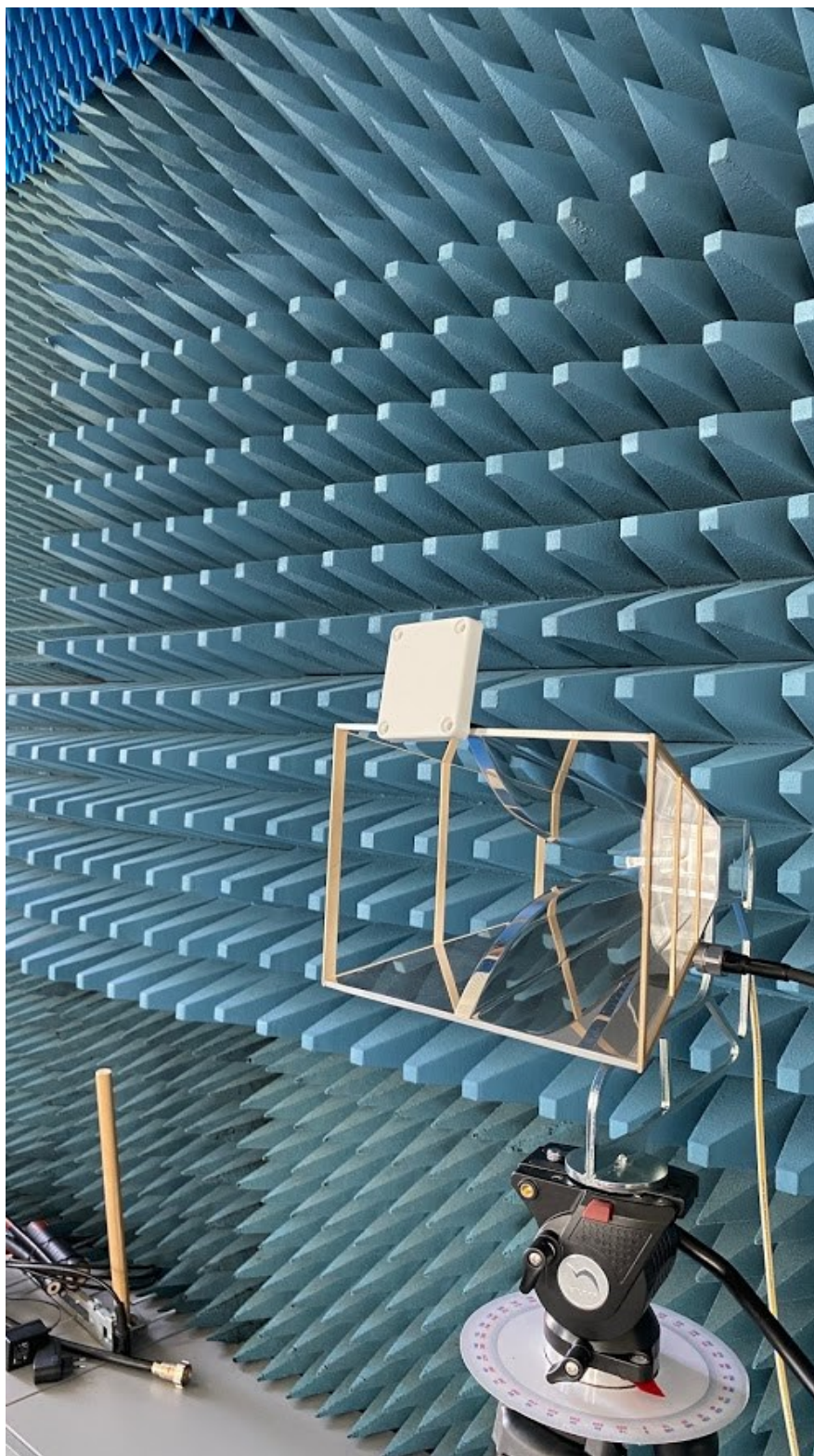


Obrázek A.4: *Okótovaný model krabičky - pohled zdola*

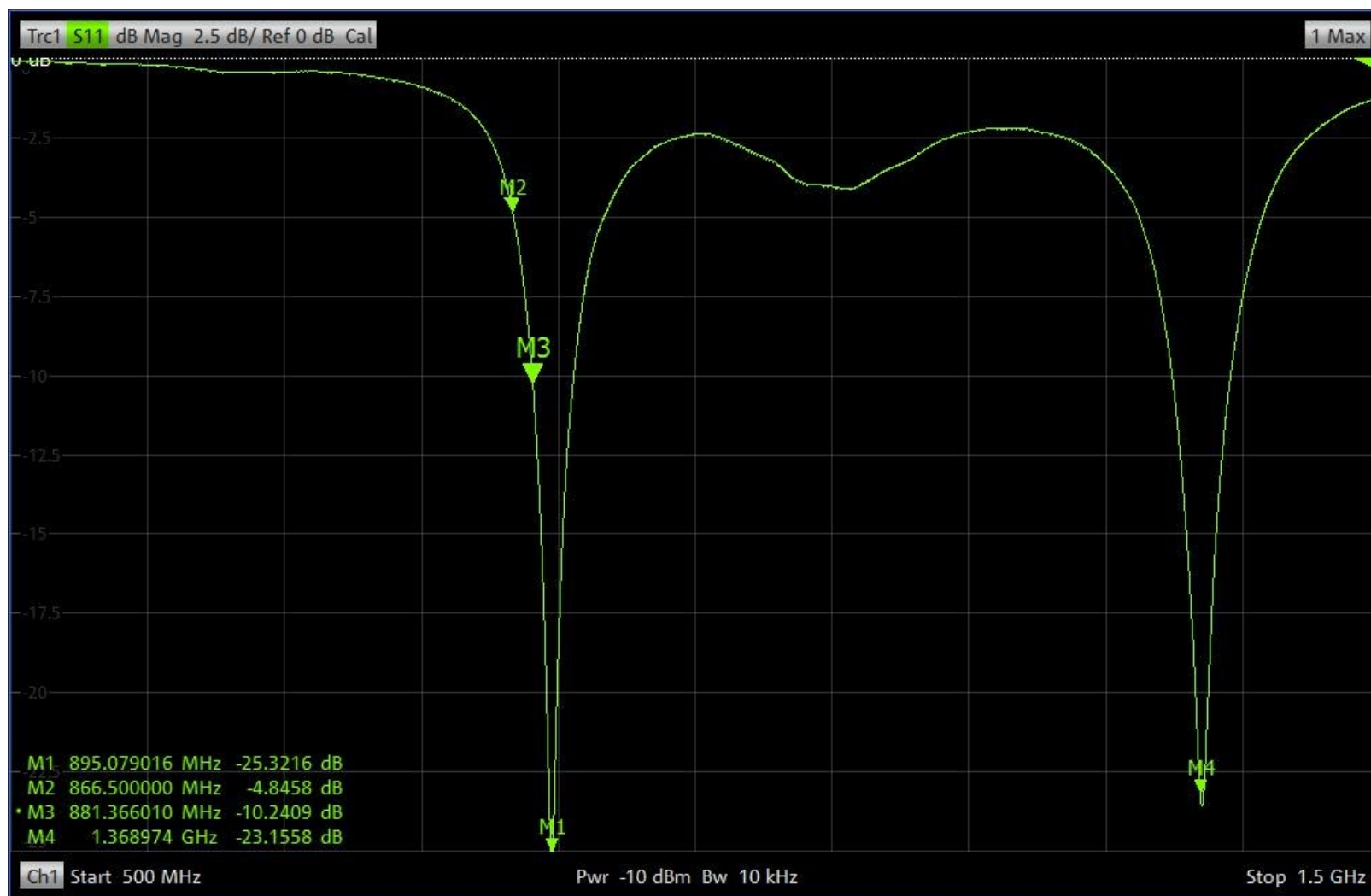
B. Měření antény

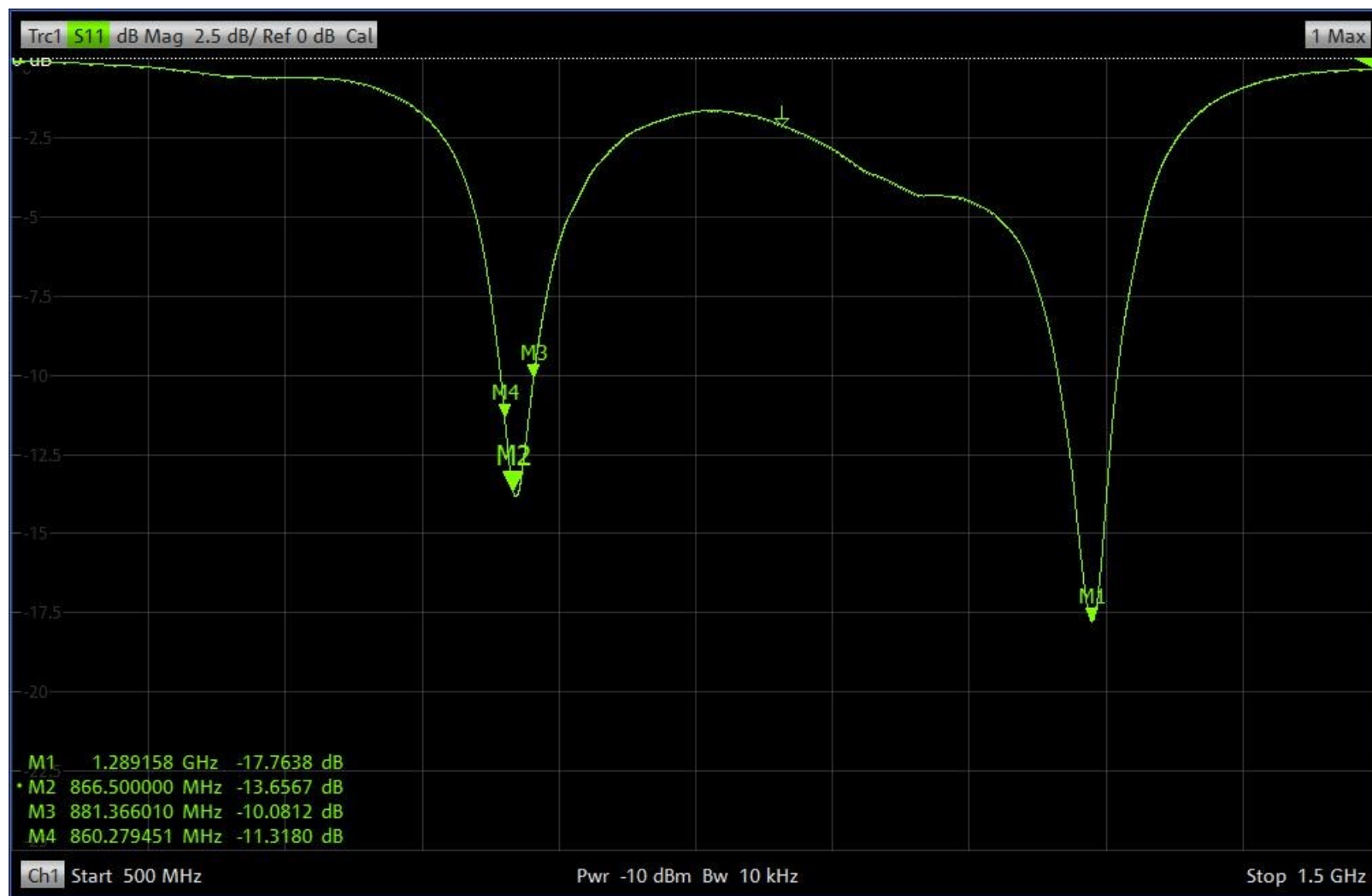


Obrázek B.1: Měření antény - první trychtýřová anténa



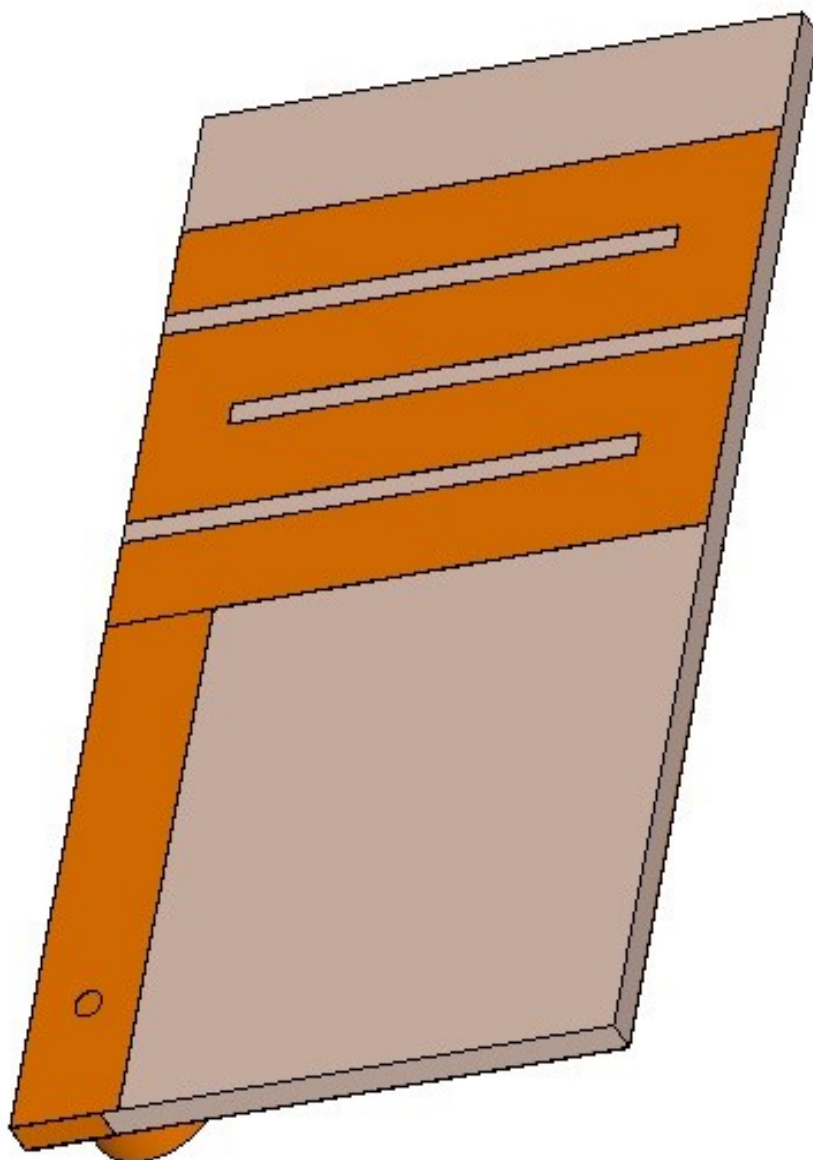
Obrázek B.2: *Měření antény - druhá trychtýřová anténa plus PIFA a víko*

Obrázek B.3: Naměřené S_{11} parametry na vektorovém analyzátoru (bez krabičky)

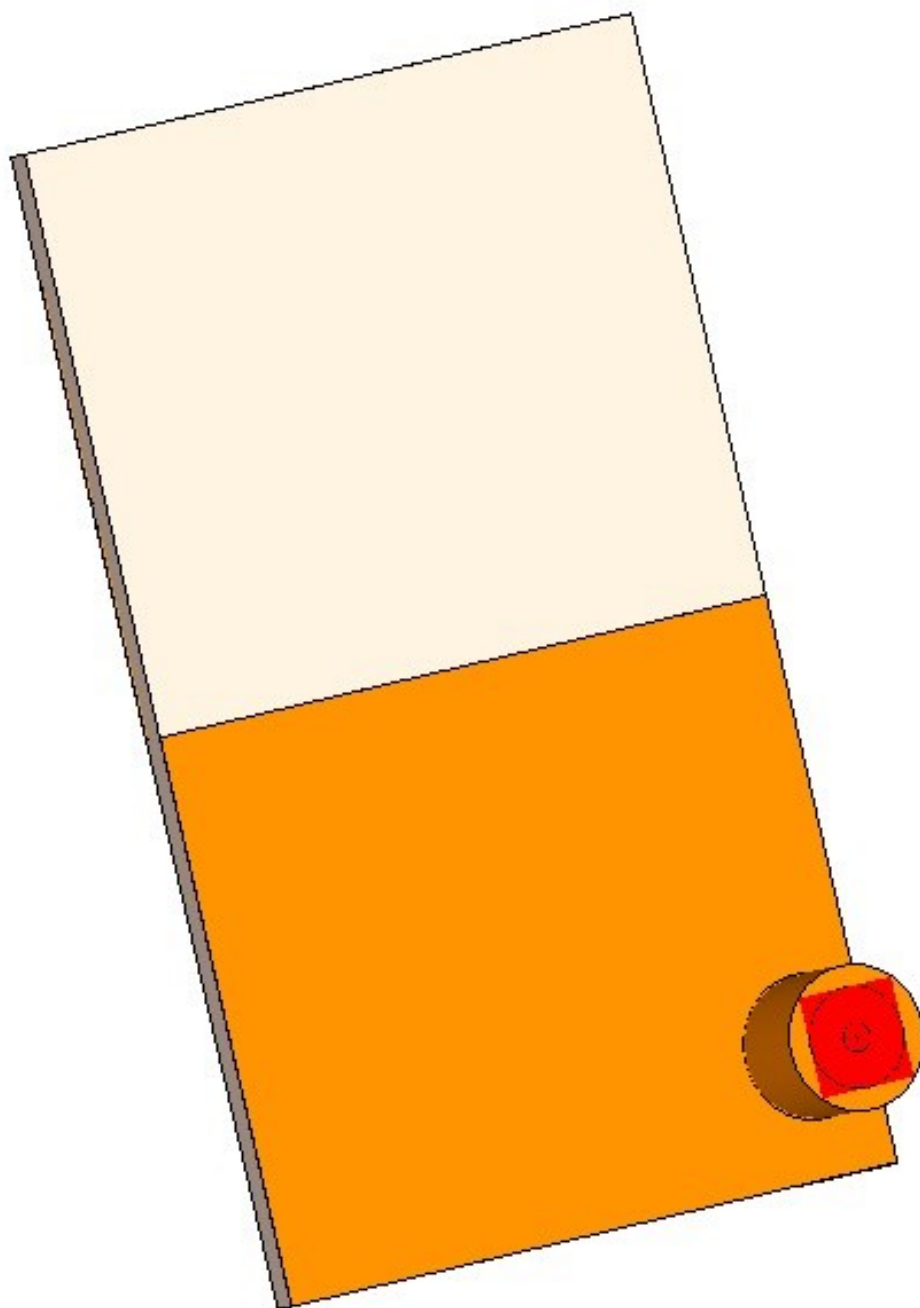


Obrázek B.4: Naměřené hodnoty na vektorovém analyzátoru (v krabičce)

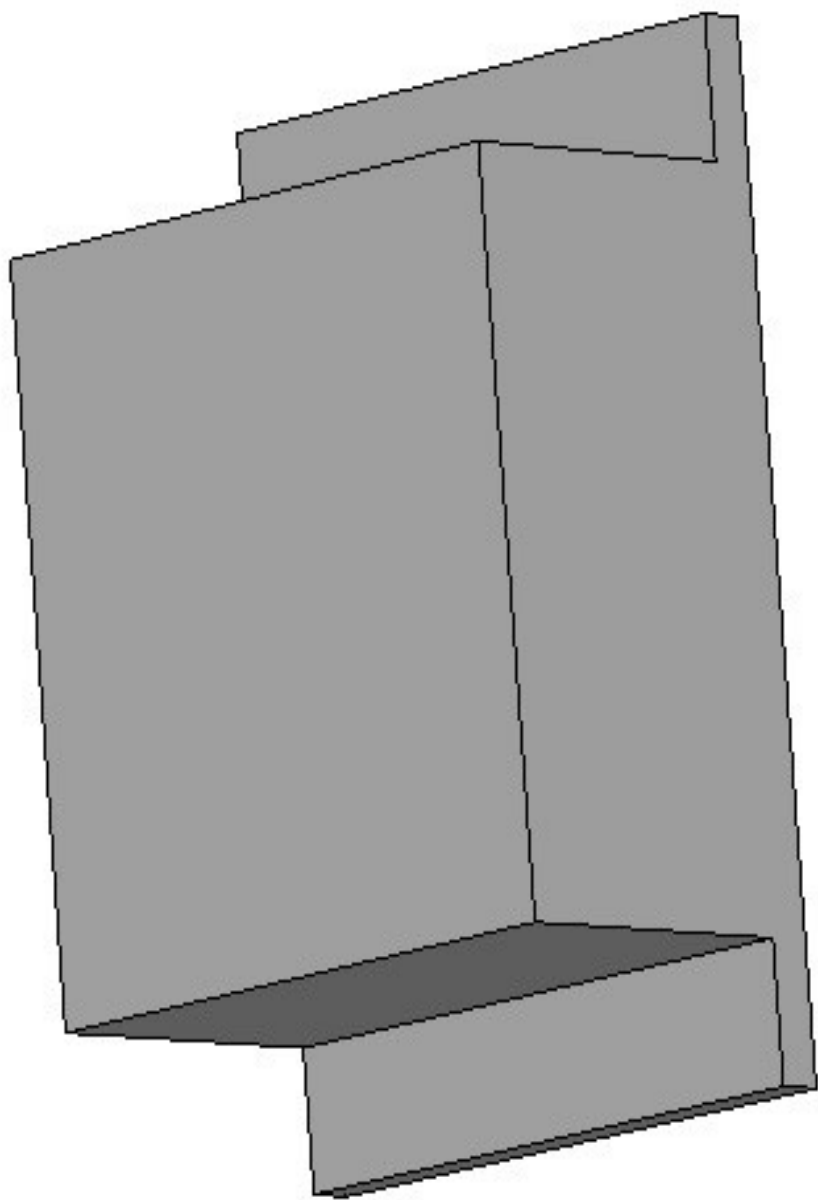
C. CST



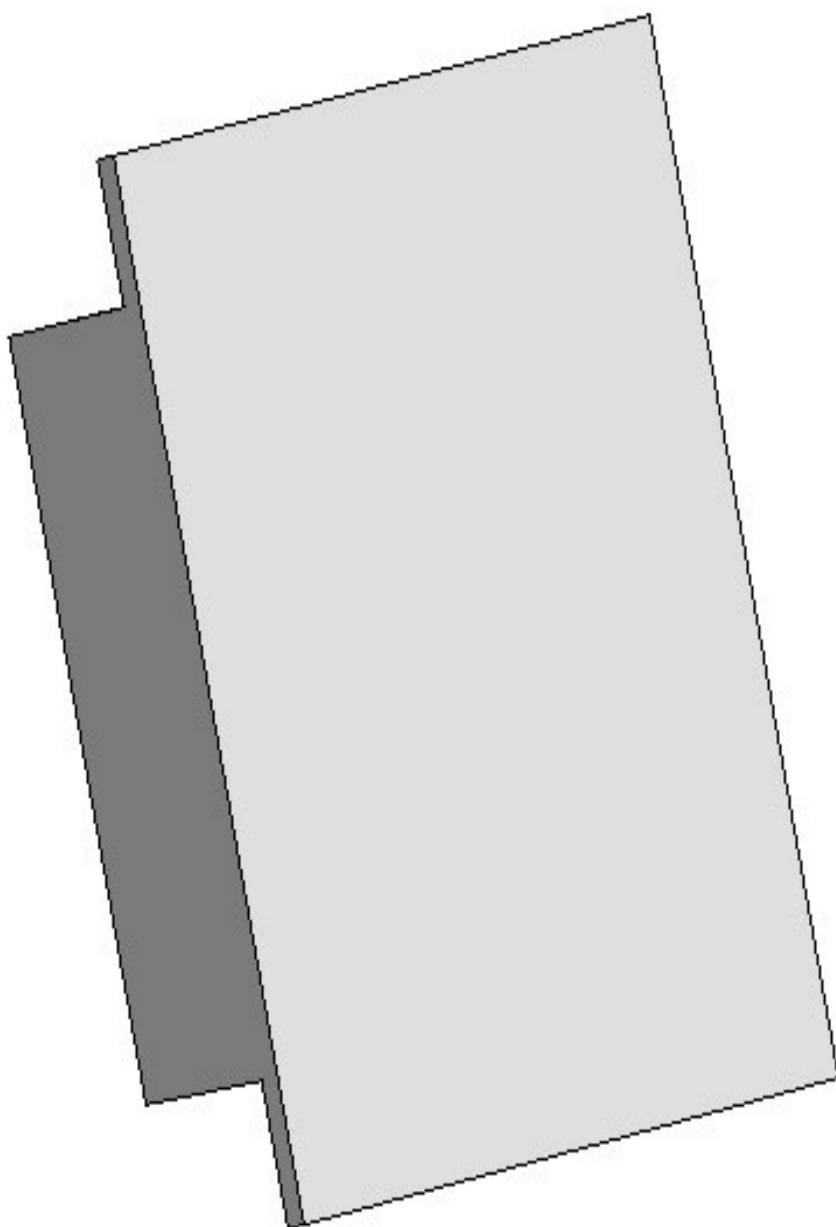
Obrázek C.1: *Model PIFY v CST studiu - pohled shora*



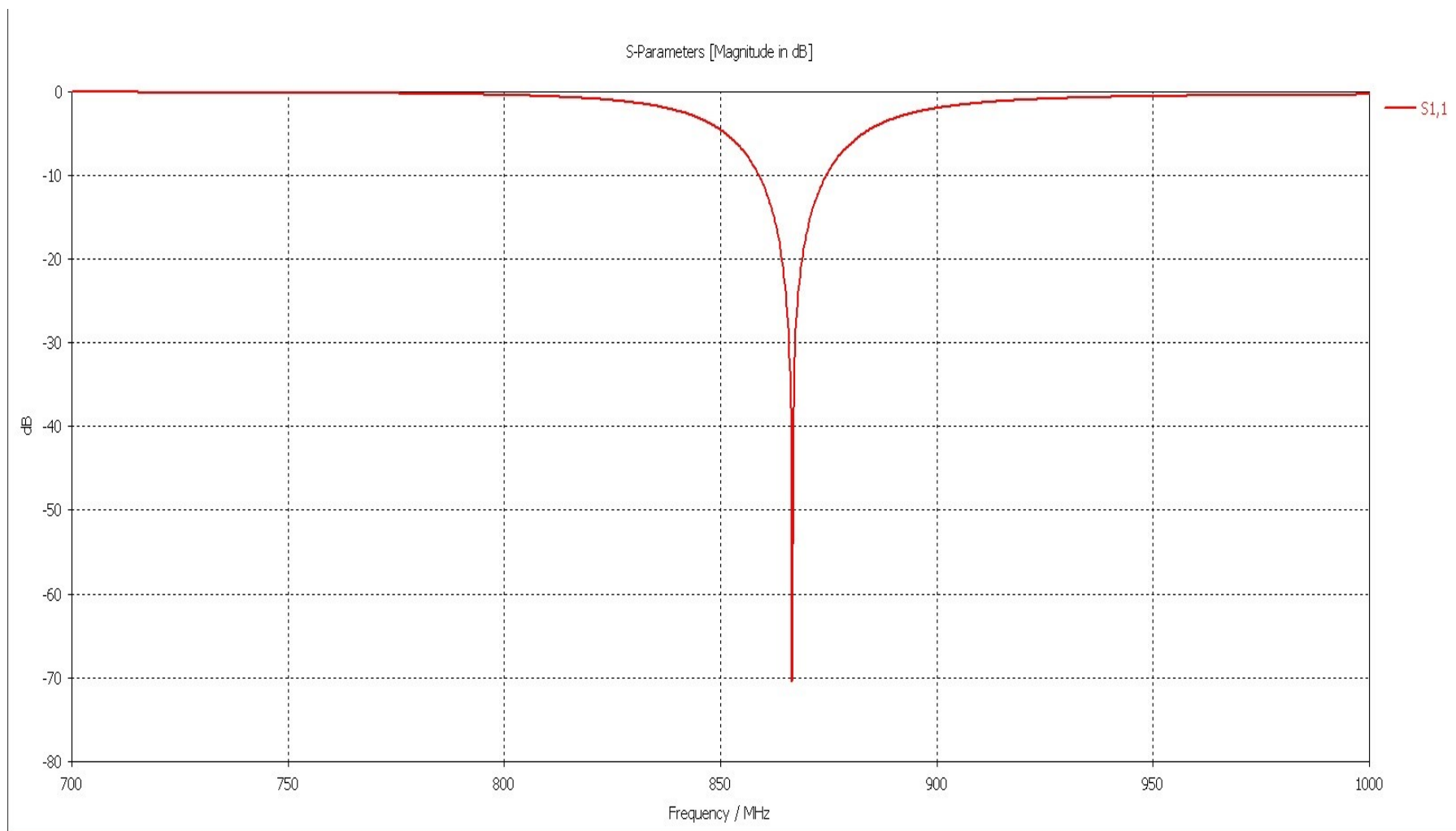
Obrázek C.2: *Model PIFY v CST studiu - pohled zdola*



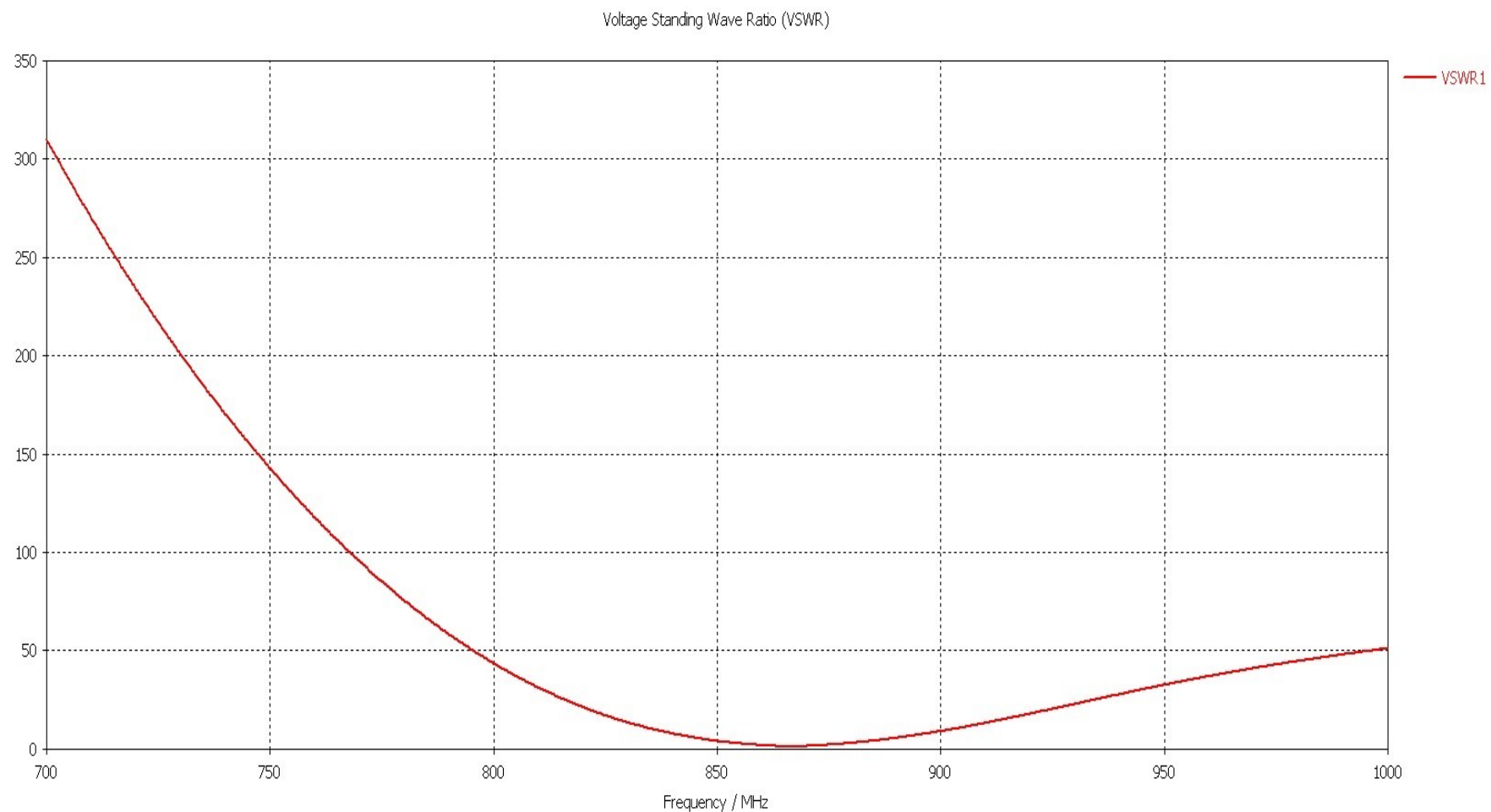
Obrázek C.3: *Model krabíčky v CST studiu - pohled shora*



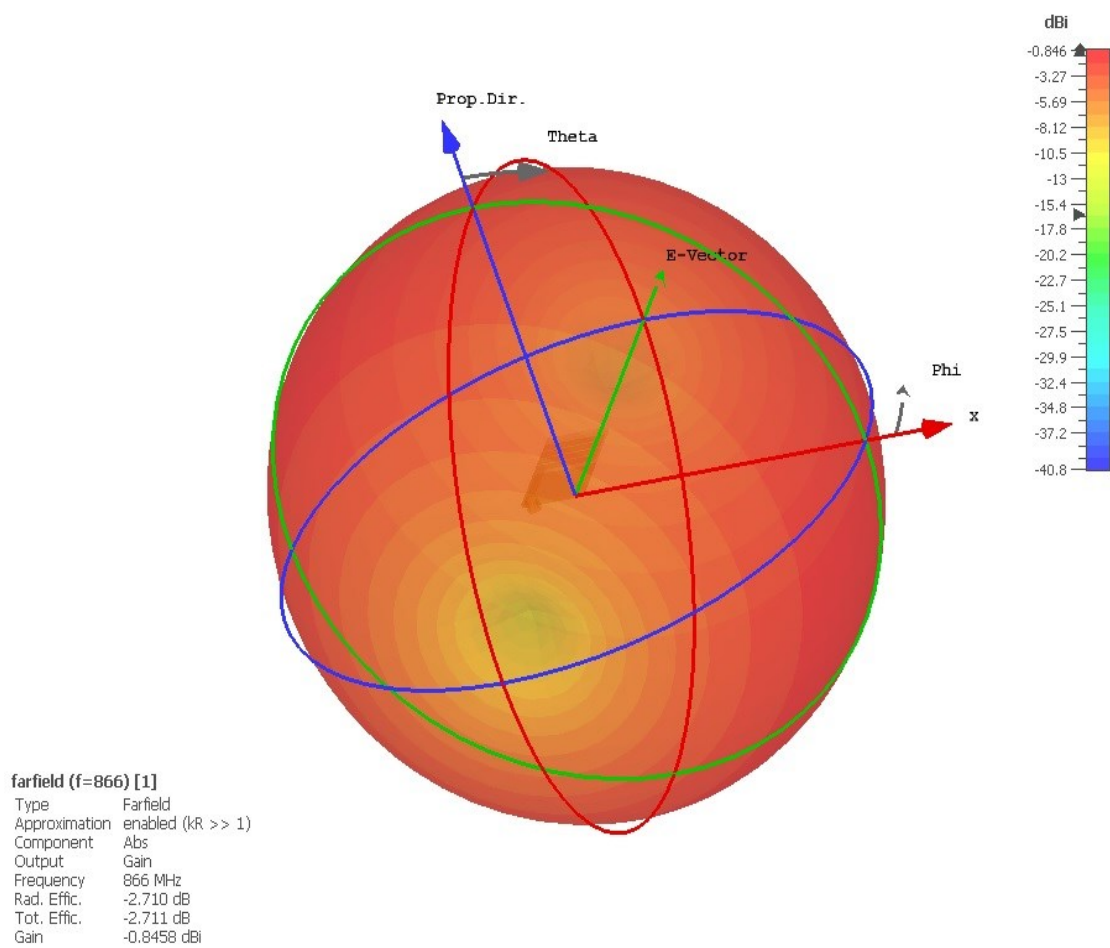
Obrázek C.4: *Model krabičky v CST studiu - pohled zdola*



Obrázek C.5: S_{11} konečného typu PIFA



Obrázek C.6: *PSV konečného typu PIFA*



Obrázek C.7: 3D vyzařovací charakteristika zisku PIFA